

2015•2016
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
*master in de industriële wetenschappen: nucleaire
technologie*

Masterproef

Het verbeteren van de meetstrategie tijdens nucleaire incidenten in
reactie op de resultaten van vaste meetstations

Promotor :
De heer Luc LIEVENS

Promotor :
dr. JOHAN CAMPS

Karel Mangelschots

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: nucleaire technologie*

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2015•2016

Faculteit Industriële

ingenieurswetenschappen

*master in de industriële wetenschappen: nucleaire
technologie*

Masterproef

Het verbeteren van de meetstrategie tijdens nucleaire
incidenten in reactie op de resultaten van vaste
meetstations

Promotor :
De heer Luc LIEVENS

Promotor :
dr. JOHAN CAMPS

Karel Mangelschots

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: nucleaire technologie*

Woord vooraf

Deze masterproef dient als cumulatie van mijn inspanningen om gediplomeerd ingenieur te worden. Daarbij erken ik dat dit zeker ook het resultaat is van de inspanningen van vele andere mensen:

- de promotor Dr. J. Camps en zijn team op het SCK•CEN die me deze mooie kans gaven om te leren hoe deze masterproef kan bijdragen aan de veiligheid en die extra moeite geleverd hebben om het me mogelijk te maken de milieuaspecten van veiligheid te onderzoeken;
- Ir. L. Lievens voor zijn vele adviezen en zijn hulp om de beste werkmethode te vinden op het lange en bochtige pad dat mijn studie soms was;
- de andere docenten en leerkrachten die hun kennis met mij deelden en me deden begrijpen hoeveel er nog te leren valt;
- Kathleen Bovin en Jessie Peters die me met veel geduld hebben bijgestaan en steeds een luisterend oor wilden verlenen;
- mijn familie die ervoor zorgde dat ik me hield aan mijn planning en die bereid bleek om mijn humeur te verdragen wanneer de druk verhoogde;
- mijn vrienden die mij gesteund hebben als het nodig was;
- en een speciaal woordje van dank aan de enthousiaste leerkracht fysica, Mevr. I. Boydens. Ik hoop dat ze mijn eerste bijdrage aan de samenleving de moeite waard vindt.

Deze masterthesis is de laatste fase van mijn studie. Het is ook mijn wens dat deze masterthesis een beginpunt mag zijn: voor mij het begin van een professionele carrière en voor andere studenten en de maatschappij het begin van een verdere verbetering van meetstrategieën en interventies bij nucleaire incidenten.

Inhoud

Lijst van tabellen	5
Lijst van figuren	7
Verklarende woordenlijst	9
Abstract	11
Abstract in English	13
1 Inleiding.....	15
2 Strategisch inzicht voor een betere reactie op incidenten.....	17
3 Methode en data	21
3.1 JRODOS berekening van het uitgewerkte scenario	21
3.2 Omwerking van de berekende meetgegevens naar de vaste en mobiele meetpunten	28
4 Beschrijving van scenario's en weersgegevens.....	35
4.1 Brontermen.....	35
4.2 Weersomstandigheden.....	38
5 Mogelijke meetstrategieën.....	41
5.1 Detectielimiet en andere criteria.....	41
5.2 Definitie van verschillende mogelijke meetstrategieën.....	44
6 Scenario's: resultaten en bespreking	49
6.1 Resultaten van scenario's	49
6.2 Bespreking van de resultaten van de scenario's	53
7 Besluit.....	67
Literatuurlijst.....	71
Bijlagen	73
A Installatiehandleiding JRODOS op Windows 64-bits	73
<i>Installation of PostgreSQL</i>	73
<i>Installation of PostGis</i>	74
<i>JRodos</i>	75
<i>Configuration of JRODOS</i>	75
<i>Starting JRodos for the first time</i>	76
B Handleiding rekenmodule	77
C Bespreking macro's rekenmodule	81
D Samenvattende resultaten van alle scenario's	Apart bijvoegsel

Lijst van tabellen

Tabel 1: Waarden voor de factoren voor 'wash-out' per nuclidegroep	24
Tabel 2: Interventiewaarden voor België en Europa per type	27
Tabel 3: Hypothetische bronterm voor een intern lek in de BR-2 gedurende 4 uur (scenario IL4)	37
Tabel 4: Hypothetische bronterm voor een intern lek in de BR-2 gedurende 24 uur (scenario IL24) ..	37
Tabel 5: Hypothetische bronterm voor een extern lek in de BR-2 gedurende 1 uur (scenario EL1)	37
Tabel 6: Hypothetische bronterm voor een extern lek in de BR-2 gedurende 4 uur (scenario EL4)	38
Tabel 7: Oorspronkelijke weersgegevens van de weermast op het SCK•CEN	39
Tabel 8: Gebruikte weersgegevens voor berekeningen in JRODOS	39
Tabel 9: Minimale relevante detectiewaarde per type	41
Tabel 10: Maatregelen voor verschillende scenario's	54
Tabel 11: Samenvattende resultaten van alle scenario's	60

Lijst van figuren

Figuur 1: Organisatie van noodmonitoring in België.....	18
Figuur 2: Schema van acties in het kader van deze masterthesis	19
Figuur 3: JRODOS Modellen en de fases die ze afdekken	21
Figuur 4: Vorming van een pluim op basis van de windrichting en –snelheid en de dispersie- coëfficiënten	23
Figuur 5: JRODOS voorstelling van gebied met verhoogde waarden met vergrotingen voor het scenario EL1 met neerslag en vaste windrichting	25
Figuur 6: JRODOS voorstelling van gebied waar het Europese interventieniveau voor bepaalde voedingswaren overschreden is.....	26
Figuur 7: JRODOS voorstelling van gebieden met verhoogde I-131 depositie in Bq/m ²	26
Figuur 8: Maxima voor Telerad-punten voor scenario EL1 met neerslag en vaste windrichting met merkbare verhoging en ingezoomd op gebied rond BR-2.....	30
Figuur 9: Legendes voor omzetting naar symbolen op Google Maps met voorbeelden.....	33
Figuur 10: Extra informatie getoond bij Telerad meetpunt IMA/M02 en punt 1507 vlakbij BR-2 in Google Maps	34
Figuur 11: Grootte van het te bemeten gebied (a) bij 2.4 nSv/h, (b) bij 5 nSv/h en (c) bij 10 nSv/h....	42
Figuur 12: Situering Telerad meetpunten met aanduiding van gebied in figuur 13 en standaard kadrering van kaarten	45
Figuur 13: Situering Telerad meetpunten in de buurt van SCK•CEN.....	45
Figuur 14: Helikopterschema met ‘Circle of Investigation’.....	47
Figuur 15: Afgebakend gebied op basis van Telerad gegevens	49
Figuur 16: Telerad en mobiele meetpunten gecombineerd	50
Figuur 17: Bepaling van eerste grenspunt in oostelijke en zuidelijke richting.....	51
Figuur 18: Afdekken van L-vormig gebied met twee rechthoeken.....	53
Figuur 19: Maxima van Telerad meetpunten voor dosistempo’s in bronterm EL1 in verschillende weersomstandigheden	55
Figuur 20: Detaillering van EL1 zonder regen en veranderlijke wind voor dosistempo's	56
Figuur 21: Detaillering van EL1 zonder regen en veranderlijke wind voor I-131	57
Figuur 22: Volledige gedetailleerde resultaten van scenario EL1 met regen en vaste windrichting voor I-131 depositie.....	58
Figuur 23: Samenvoeging van de depositiefiguur uit RODOS voor scenario EL1 met neerslag en vaste windrichting met de helikoptervlucht zonder de punten waarvoor de detectielimiet niet werd overschreden.....	62
Figuur 24: Grafiek van het dosistempo van Telerad punt IMA/M00 in scenario EL1 met neerslag en stabiele wind.....	63
Figuur 25: Grafiek van het dosistempo van Telerad punt IMA/T03 in scenario EL1 met neerslag en stabiele wind.....	63
Figuur 26: Grafiek van de I-131 depositie van Telerad punt IMA/M02 in scenario EL1 met neerslag en stabiele wind.....	64
Figuur 27: Vergelijking ruwe RODOS-gegevens met de resultaten van de rekenmodule.....	65

Verklarende woordenlijst

Aerosol:	Fijn verdeeld stof van een bepaald materiaal dat in suspensie door de atmosfeer verspreid kan worden
BR-2:	Belgian Reactor 2 (ingebruikname 1961)
Bronterm:	De hoeveelheid activiteit die tijdens een incident vrijkomt
Dispersie:	Verspreiding van een bepaald materiaal
DepoM:	Depositie berekeningen voor FDMT
Depositie:	Afzetting van een bepaald materiaal
ED50:	European Datum 1950
EMERSIM:	Simulatie van vroege tegenmaatregelen en dosissen in de buurt
ETRS98:	European Terrestrial Reference System 1989
FANC:	Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle
FDMT:	Food chain and Dose Module for Terrestrial pathways
INES:	International Nuclear and Radiological Event Scale
IRE:	Institut national des RadioÉléments
JRODOS:	Java-based Real-time On-line DecisiOn Support
LMSC:	Local-Scale Model Chain
MAST gegevens:	Weersgegevens inclusief neerslagdata die in het SCK•CEN weerstation automatisch worden opgemeten
RODOS:	Real-time On-line DecisiOn Support
SCK•CEN:	Studie Centrum voor Kernenergie • <i>Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire</i>
Telerad:	Het radiologisch toezichtstelsysteem van het FANC
UTM:	Universele Transversale Mercatorprojectie

Abstract

In nucleaire noodsituaties willen de verantwoordelijken voor crisisbeheer kennis over de radiologische impact en de efficiëntie van beschermende acties. Het in Europese context ontwikkelde systeem JRODOS brengt de impact en gevolgen van een nucleair ongeval in kaart. Het ondersteunt zo beslissingen over tegenmaatregelen. Het berekent snel de spreiding van radio-isotopen met atmosferische dispersie en depositie modellen. Metingen moeten deze berekeningen steeds bevestigen. Meetefficiëntie over de grote gebieden die mogelijk besmet zijn, geeft tijdswinst en begeleidt de beschermende acties. Deze thesis onderzoekt hoe een optimale meetstrategie te bepalen voor mobiele meetteams op basis van vaste meetstations.

De module ontwikkeld voor deze thesis gebruikt JRODOS gegevens om meetwaarden te simuleren voor specifieke punten en om punten te bepalen die extra aandacht nodig hebben. De module kan ook een parallel-lijn-vliegpatroon voor een helikopter met meetapparatuur aan boord genereren. Zo'n helikoptervlucht levert extra waarden om te vergelijken met de simulaties en om beslissingen over beschermende maatregelen te ondersteunen.

Als voorbeeld in de thesis zijn vier denkbeeldige scenario's met atmosferische lozingen voor de BR-2 van het SCK•CEN gebruikt gecombineerd met vier verschillende meteorologische omstandigheden. Al deze combinaties zijn uitgewerkt als voor een noodplanoefening.

Google Maps toont de resultaten van de verwerking. Deze voorstelling helpt om communicatie te verduidelijken.

Abstract in English

During nuclear emergencies parties responsible for crisis management need knowledge on its radiological impact and the effectiveness of protective actions. The JRODOS system is developed in a European context and maps the impact of such accidents. This way it supports countermeasure decisions. It calculates values on the spread of isotopes based on atmospheric dispersion and deposition models. Measurements should confirm these results. Measurement efficiency over large possibly affected areas result in less time lost and guide on protective actions. This thesis investigates how to find an optimal measuring strategy for mobile measurement equipment based on measurements from fixed stations.

The module developed for this thesis uses JRODOS data to simulate readings for specified measurement points and indicates points requiring extra attention. Also the program generates a parallel line flight pattern for a helicopter with measuring devices on-board. This flight will deliver extra values to compare with the simulations and support decisions on protective actions.

As examples in this thesis four hypothetical scenario's with atmospheric discharge for the BR-2 of the SCK•CEN are combined with four different weather situations. All these combinations have been treated as in an emergency planning exercise.

The results of the calculations are visualised in Google Maps. This representation helps to facilitate communication.

1 Inleiding

Ondanks alle veiligheidsmaatregelen kunnen nucleaire ongevallen niet uitgesloten worden. De organisatie van het nucleair noodplan, met de bedoeling de gevolgen voor de bevolking en het leefmilieu te beperken indien zich een nucleair ongeval voordoet, is beschreven in het KB van 17 oktober 2003. - Koninklijk besluit tot vaststelling van het nucleair en radiologisch noodplan voor het Belgisch grondgebied. Het nucleair noodplan voorziet de samenwerking van een aantal organisaties met nucleaire en radiologische expertise waaronder het FANC, het SCK•CEN en het IRE alsook experts in rampenmanagement vanuit de civiele bescherming en het FAVV.

Daarom beheert het FANC onder meer het Telerad-netwerk. Dit netwerk bestaat uit een aantal vaste meetstations. Die doen voortdurend metingen van de radioactiviteit en sturen deze gegevens door naar een centrale meldkamer. Op basis van deze verzamelde gegevens detecteert men snel afwijkingen. Een incident zal dus een betere opvolging krijgen. De reactie hierop is vaak sterk afhankelijk van de weersomstandigheden omdat de verspreiding van radionucliden voornamelijk verloopt via een radioactieve wolk die door de wind verplaatst wordt en van waaruit de radioactieve fall-out neerdaalt.

Bij een incident kan het FANC een beroep doen op andere instanties die dan hun expertise, hun werknemers en hun materiaal ter beschikking zullen stellen. Om voldoende voorbereid te zijn, maakt deze groep plannen met scenario's die vanuit bepaalde veronderstellingen werken en de meest logische of aangewezen maatregelen bevatten. Om deze plannen te testen op hun bruikbaarheid en om mensen vertrouwd te maken met hun inhoud, oefent men ze tijdens noodplanoefeningen. Tijdens deze oefeningen wordt ook gebruik gemaakt van softwarepakketten die specifiek ontwikkeld zijn om het verloop en de gevolgen van zo'n incident te simuleren.

Deze masterthesis werkt een aantal denkbeeldige scenario's uit voor enkele specifieke meteorologische omstandigheden. Het pakket JRODOS is ook voor een dergelijk doel ontwikkeld. Het doel is om vanuit de waarden die door JRODOS zijn uitgerekend, de beslissing van een crisiscel te assisteren door een methode uit te werken die zal helpen om op een efficiënte manier de nodige bijkomende meetgegevens te verzamelen na het overtrekken van de radioactieve wolk. Dit proces moet immers snel verlopen zodat de reacties voldoende snel kunnen volgen en sommige problemen vermeden worden.

Door de gegevens vanuit JRODOS om te zetten naar een verwachte waarde in vooraf bepaalde punten kan het hypothetische scenario gebruikt worden om realistische metingen te simuleren. Daarna werkt de thesis met deze gegevens een optimale meetstrategie uit. Deze strategie wordt dan door de rekenmodule ingevuld met meetwaarden uit de simulatie. Deze zullen de correctheid van de strategie bevestigen.

Deze masterthesis zal ook ingaan op de mogelijkheden om uit de resultaten van deze poging lessen te trekken voor andere mogelijke strategieën en verbeteringen van de huidige berekeningsmodule.

2 Strategisch inzicht voor een betere reactie op incidenten

Bij een nucleair incident is het nodig om snel en efficiënt te reageren en te anticiperen op de verwachte evolutie van de situatie. Dit besef maakt dat experts in de nucleaire industrie en de noodplanrespons behoefte hebben aan accurate, duidelijke en snel beschikbare informatie bij een dergelijk incident. Ook het bredere publiek zal met perioden een verhoogde interesse vertonen in de mogelijke gevolgen van nucleaire incidenten en bijhorende maatregelen eisen om incidenten te voorkomen.

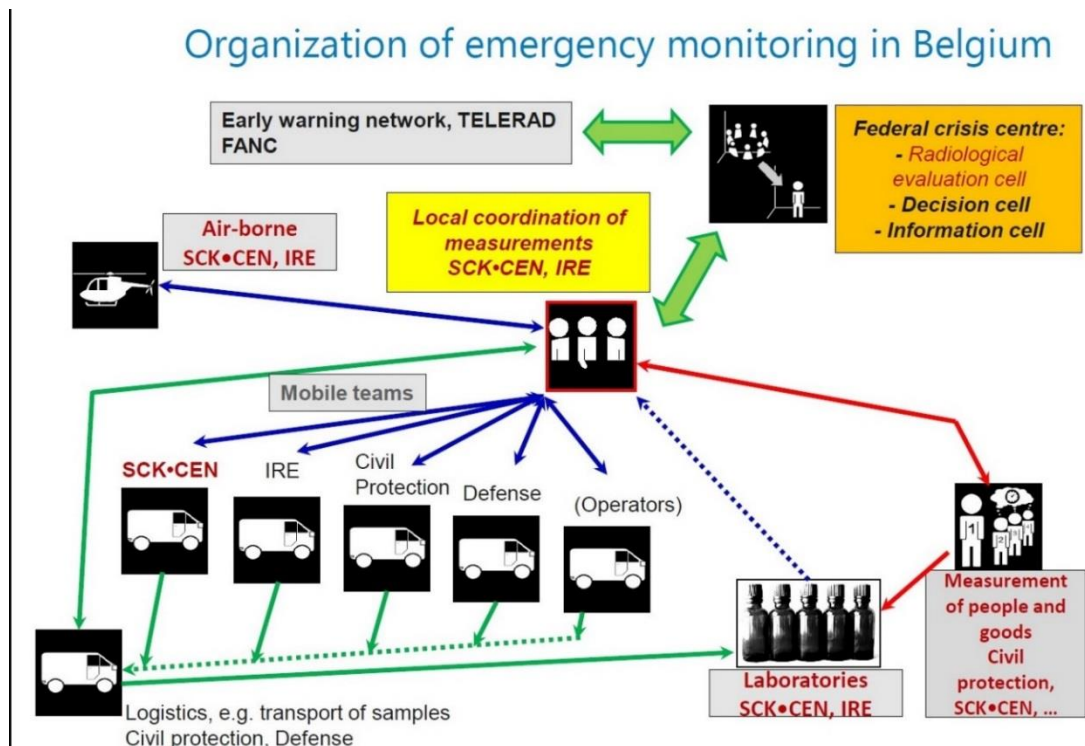
De recente verjaardagen van de incidenten in de nucleaire centrales van Chernobyl en Fukushima, beide als niveau 7 op de INES-schaal ingeschat, bracht het belang hiervan opnieuw in de algemene aandacht. Daarenboven heeft de controverse rond de verlenging en heropstart van de Belgische nucleaire energiecentrales de aandacht van de media voor mogelijke incidenten verhoogd.

Het verleden heeft ons geleerd dat de handelingen die mensen in zulke situatie stellen catastrofale gevolgen kunnen hebben. De analyse van de hierboven vermelde incidenten in Chernobyl en Fukushima toont aan dat sommige acties van de operatoren of de crisiscellen de gevolgen van deze incidenten hadden kunnen vermijden of verminderen. Dit alles benadrukt dan ook het belang van het opstellen en onderhouden van noodplannen voor nucleaire incidenten.

In België bereidt het FANC dergelijke noodplannen voor. Meer specifiek zal de voorbereiding van de procedures voor het uitvoeren van de metingen vallen onder de werkgroep GEPETO-Celmes. Het FANC doet hiervoor normaal een beroep op de expertise van verschillende andere instellingen waaronder het SCK•CEN en het IRE zoals ook getoond in figuur 1 [1]. Zij brengen hun expertise aan om deze plannen zo concreet mogelijk uit te werken. Dit helpt om de meest gepaste reacties te identificeren. Tijdens noodsituaties worden zij ook ingeschakeld om bijkomende metingen, analyses en decontaminaties te doen.

Deze instellingen leveren tijdens een incident ook analyses aan die een juiste inschatting van de ernst van het incident en de meest gepaste reacties aanduiden. Op zulke momenten is er weinig tijd om te overleggen zodat het van belang is om verschillende opties reeds vooraf tegen elkaar af te wegen. Indien zich onvoorziene omstandigheden voordoen, kan overleg desnoods ook nog op het ogenblik zelf.

Het SCK•CEN organiseert ook geregeld noodplanoefeningen om de plannen te toetsen aan realistische condities en eventuele problemen bij te sturen. Deze masterthesis past in dit voortdurend streven naar het verbeteren van de noodplanresponse. De resultaten ervan zijn zowel bruikbaar om noodplanoefeningen realistischer te maken als bij echte incidenten. Ze geven een beter zicht op een optimale inzetbaarheid van de meeteenheden en -methodes. De automatische verwerking van de simulatie resultaten uit JRODOS naar specifieke gekende meetpunten levert een betere validatie van deze simulaties op zodat beslissingen die zich hierop baseren een grotere zekerheid hebben hun doel te bereiken.



Figuur 1: Organisatie van noodmonitoring in België

De hier gebruikte simulaties zijn voorbeelden die toelaten om een dergelijke oefening na te bootsen. Zoals hieronder in figuur 2 afgebeeld begint dit met het verzamelen van de relevante gegevens. Op basis van deze gegevens start het JRODOS programma de EMERGENCY-simulatie. Tijdens een dergelijke EMERGENCY-simulatie voorziet het programma de berekening van de volgende modellen:

- Het LMSC-model (*Local-Scale Model Chain*) met gebruik van het ATSTEP dispersiemodel voor het berekenen van de verspreiding van de radionucliden;
- Het EmerSim-model (*Emergency Simulation*) om de effecten van de tegenmaatregelen gedurende de eerste periode te evalueren;
- Het DepoM-model (*Deposition Model*) dat afzetting van radionucliden voor de FDMT-module berekent;
- De FDMT-module (*Food chain and Dose Module for Terrestrial pathways*) die nagaat welke overdracht er gebeurt naar de populatie door de voedselketen of andere manieren van blootstelling;

De resultaten hiervan worden dan geëxporteerd en gebruikt om de berekende waarden voor de Telerad meetpunten en de gebruikelijke mobiele meetpunten vast te stellen. De berekeningsmodule zal deze laatste stap uitvoeren zoals uitgedrukt door de groene pijl in het schema. De punten worden daarna voorgesteld op een kaart in Google Maps. Dit helpt om het gebied dat meer gedetailleerd onderzoek vraagt, af te lijnen. Dit is één van de belangrijkste (en dus rode) stappen in het vastleggen van een efficiënte meetstrategie. Als de meetstrategie uitmondt in de beslissing om met een helikopter verdere metingen uit te voeren legt men een vliegroute vast. Ook hierin kan de rekenmodule helpen.

Vervolgens zal de berekeningsmodule de eerder geëxporteerde resultaten omvormen naar waarden voor de meetpunten van de helikoptervlucht. Deze waarden kunnen dan ter controle vergeleken worden met de resultaten uit de JRODOS simulatie.



Figuur 2: Schema van acties in het kader van deze masterthesis

Het is nuttig te bekijken hoe JRODOS de basisgegevens gebruikt om een simulatie van het incident uit te voeren vooraleer verder te gaan naar de verdere stappen.

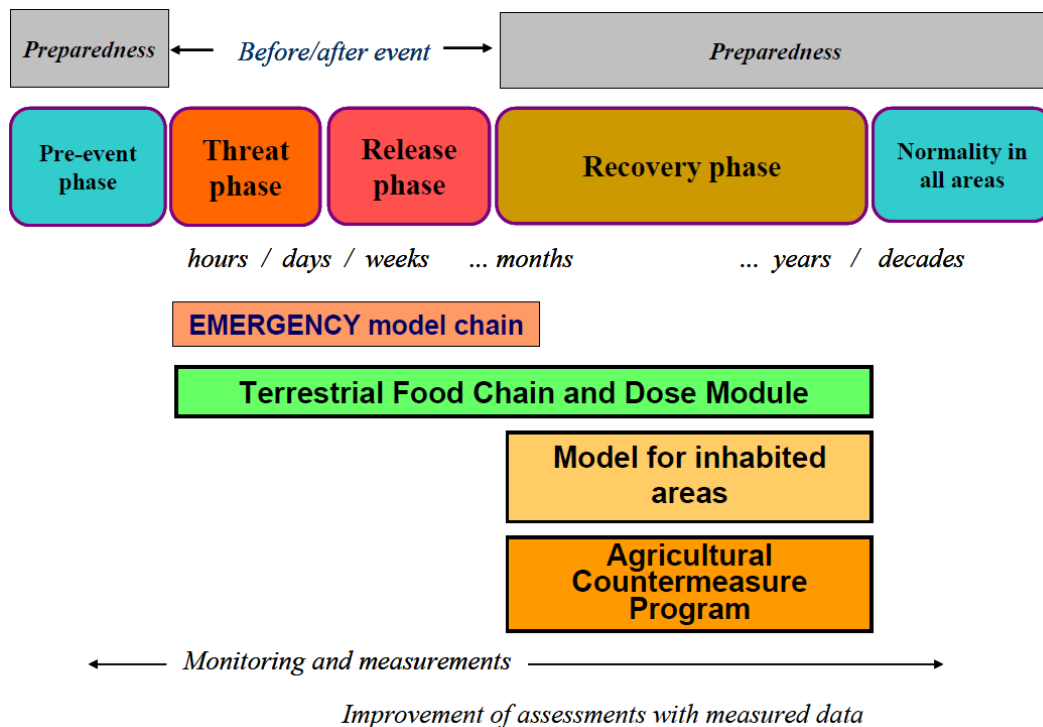
3 Methode en data

Deze masterthesis gaat uit van simulaties van hypothetische incidenten voor de BR-2-reactor. De totstandkoming van deze simulaties krijgt dus eerst aandacht. Daarna volgt uitleg over hoe de verwerking van deze gegevens naar andere formaten gebeurt.

3.1 JRODOS berekening van het uitgewerkte scenario

Bij het uitwerken van veiligheidsprocedures en noodplannen werken nucleaire experts met gesimuleerde incidenten. Om te weten hoe de meteorologische omstandigheden en de eigenschappen van het incident samenwerken en welke gevolgen een incident met de voorziene reacties erop heeft voor de omgeving en het milieu, zijn tegenwoordig een aantal computermodellen ontwikkeld. Één van de initiatieven om dit te doen is het RODOS-project dat begon als reactie op het Chernobyl-incident van 1986. Het project krijgt financiering vanuit verschillende ‘*Euratom Research Framework Programmes*’ onder coördinatie van het ‘*Karlsruhe Institute for Technology*’ (KIT). De laatste versie van dit beslissingsondersteunend programma is ontwikkeld in de Java technologie. Dit heeft het voordeel dat het programma niet meer afhankelijk is van het besturingssysteem en dus op veel meer soorten computers kan werken. Het is ook mogelijk om een onafhankelijk systeem op te zetten dat niet noodzakelijk afhankelijk is van een centrale database. Dit heeft het voordeel dat experts op verschillende machines gelijktijdig berekeningen kunnen uitvoeren. De resultaten bewaart men als projecten en kan men uitwisselen ter vergelijking.

JRODOS biedt daarenboven de mogelijkheid tot verschillende soorten berekeningsmanieren. Deze kunnen ingezet worden om verschillende doelen te bereiken zoals hieronder getoond in figuur 3 [2]. Sommige zijn eerder bedoeld voor de periode van en onmiddellijk volgend op het incident. Andere zijn bedoeld om een opvolging op lange termijn van het incident te doen.



Figuur 3: JRODOS Modellen en de fases die ze afdekken

Voor deze masterthesis ligt de focus op de periode van en kort na het incident. Daarom gebruiken de simulaties de EMERGENCY-berekeningsmodule. De hier gebruikte EMERGENCY-module steunt onder meer op het atmosferisch dispersie model ATSTEP om de volgende verspreidingen en hun gevolgen te berekenen:

- Tijdsverloop per beschouwd nuclide uit de bronterm van
 - de verspreiding in de radioactieve wolk
 - de activiteit in de lucht op een hoogte van 1 m
 - de droge, natte en gezamenlijke afzetting op de grond
- Geïntegreerde waarden per beschouwd nuclide van
 - de verspreiding in de radioactieve wolk
 - de activiteit in de lucht op een hoogte van 1 m
 - de droge, natte en gezamenlijke afzetting op de grond
- Plaatsen met een overschrijding van de Europese limieten voor luchtconcentratie
- Totale depositie van aerosolen
- Aankomsttijd van de radioactieve wolk per beschouwd deelgebied. Deelgebieden verschillen in grootte naarmate hun afstand tot de oorsprong van de bronterm
- Totale gamma dosistempo's
- Effectieve gamma dosistempo's afkomstig van
 - de grond, zowel het totaal als voor elk van de nucliden
 - de wolk
- Overschrijding van de interventiewaarde voor verschillende voedselsoorten zoals melk en verschillende soorten groenten en gewassen voor:
 - jodium-isotopen
 - cesium-isotopen
 - strontium-isotopen
 - α -stralers
- Langetermijndosissen afkomstig van deposities:
 - per leeftijdscategorie
 - voor verschillende perioden (per jaar, gedurende verdere leven)
 - voor de schildklier of het gehele lichaam
- Langetermijndosissen afkomstig van ingestie:
 - per leeftijdscategorie
 - voor verschillende perioden (per jaar, gedurende verdere leven)
 - voor de schildklier of het gehele lichaam
- Langetermijndosissen afkomstig van inhalatie:
 - per leeftijdscategorie
 - voor de schildklier of het gehele lichaam
- Langetermijndosissen afkomstig van blootstelling zonder inhalatie:
 - per leeftijdscategorie
 - voor verschillende perioden (per jaar, gedurende verdere leven)
 - voor de schildklier of het gehele lichaam
- Potentiële dosis afkomstig van
 - gammastraling van de wolk
 - gammastraling van de grond
 - inhalatie
 - totaal van de voorgaande

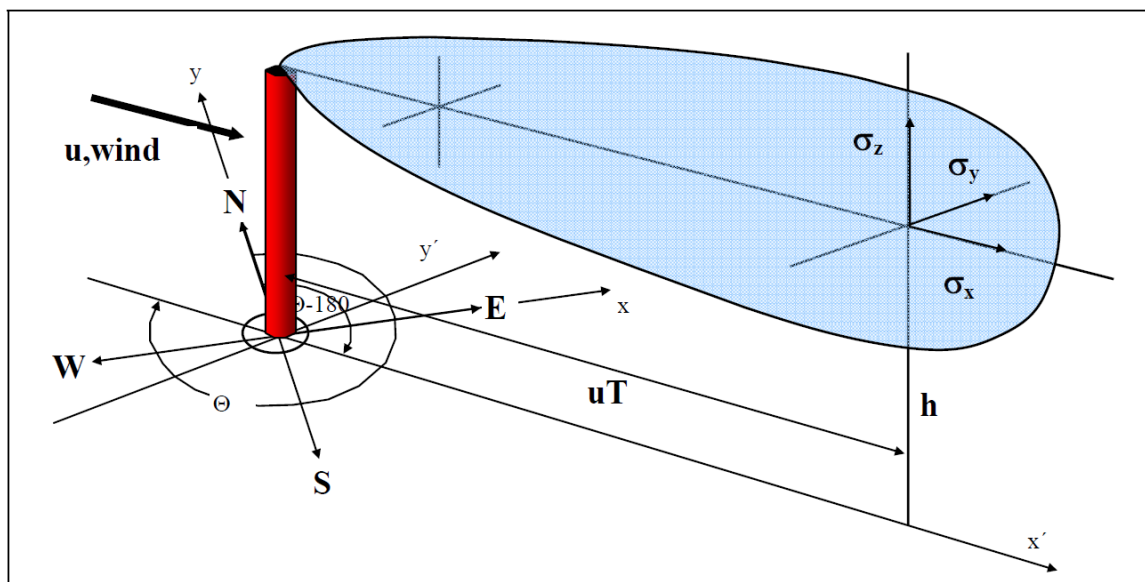
voor:

- ruggenmerg
- longen
- schildklier
- baarmoeder
- het gehele lichaam

Voor de verdere verwerking van de gegevens is enkel gebruik gemaakt van de verspreiding van de nucliden I-131 en Cs-137 en van de totale dosistempo's. De effecten op de voeding zijn vooral afhankelijk van deze twee radionucliden. De specifieke deeldosissen van I-131 en Cs-137 worden niet noodzakelijk gemeten door alle Telerad-meetpunten of door de eerste metingen van de mobiele teams of de helikopter. Deze moeten dus afgeleid worden uit deze berekende meetgegevens en de analyses van de stalen genomen na de stabilisatie van de noodsituatie.

ATSTEP dispersiemodel

Het ATSTEP dispersiemodel gebruikt door JRODOS zal de verspreiding van de radionucliden in de atmosfeer berekenen in stappen van 10 minuten. De resultaten worden getoond in stappen van 10, 30 of 60 minuten. De berekeningen voor deze thesis maken gebruik van gegevensuitvoer per 60 minuten. Zolang de bronterm voortduurt, zal het model per stap een 'pluim' maken. Elk van deze pluimen wordt in de verdere stappen als input gebruikt en aangepast aan de dan heersende omstandigheden. Het model gaat uit van een Gaussiaanse dispersie in de lucht waarbij de verspreidingsnelheden in de drie dimensies van de ruimte én in de tijd variëren. Dit geeft aanleiding tot radioactieve pluimen die initieel ongeveer de vorm hebben van een afgeknotte kegel met een ellips als grondvlak maar waarbij zowel het grondvlak als het afgeknotte vlak een ellipsoïdale uitstulping vertonen zoals voorgesteld in figuur 4 [3].



Figuur 4: Vorming van een pluim op basis van de windrichting en –snelheid en de dispersie-coëfficiënten

Doorheen het proces zal de pluim mogelijks wel een andere vorm krijgen. Bij het bereiken van de grond zal de pluim immers niet verder kunnen uitbreiden in deze richting. Dit heeft een effect op de depositie op die plaats en op de radioactieve inhoud van de pluim. Het programma houdt rekening met een eventuele temperatuursinversie op een bepaalde hoogte om een verdere verticale uitbreiding van de pluim tegen te gaan. JRODOS veronderstelt wel uniforme condities binnen de pluim.

Het model houdt per stap rekening met de geometrie van de omgeving, de meteorologische gegevens en de transportvectoren op basis van windsnelheid en -richting. Daarna berekent het voor elke pluim hoe deze zal veranderen in grootte en naar waar ze zich zal verplaatsen.

Voor elke depositiegroep wordt per pluim en per stap gekeken hoe de inhoud aan radionucliden zich zal gedragen. Dit gebeurt voor elk nuclide apart waardoor de groep een totaal krijgt dat gebaseerd is op deze deelberekeningen maar ook rekening kan houden met dochternucliden die van nuclidegroep ‘verhuizen’ door verval.

Op basis van verwachte depositie en het natuurlijke verval wordt de inhoud van de pluim op het einde van de periode vastgesteld. Op ditzelfde moment past het systeem de depositie op de plaatsen waar die pluim overgetrokken is, aan. De berekeningen hiervoor zijn onderverdeeld in de droge en de natte depositie.

De droge depositie is afhankelijk van de depositiesnelheid per nuclide. Die hangt af van de aanwezige contaminatie en de concentratie van het nuclide in de pluim en ter hoogte van het contactoppervlak met de bodem. Deze versie van JRODOS houdt rekening met het grondgebruik van elk oppervlak. Graslanden zullen door hun lagere weerstand tegen de wind een lagere depositie geven dan bijvoorbeeld bossen, maar de depositie in deze laatste heeft meestal een minder groot effect op de bevolking of de voedselproductie omdat hier gemiddeld weinig mensen aanwezig zijn en geen voedselproductie gebeurt.

De natte afzetting is verbonden met de neerslag tijdens de stap. Deze zal geen effect hebben op de edelgassen die niet oplossen of zich vasthechten aan de regendruppels maar wel op de Jodia en de aerosolen. De ‘wash-out’ berekent het programma op basis van de formule $C_w = A \cdot \Delta t \cdot \int \chi \cdot dz$ waarbij χ de verticale Gaussiaanse verdeling voorstelt.

De factor A is verschillend per nuclidegroep op basis van de factoren in tabel 1 en de formule [4]:

$$A = a \cdot \left(\frac{I}{1}\right)^b$$

De elementen van deze formule zijn:

A : De ‘wash-out’-coëfficiënt [1/s]

I : De intensiteit van de neerslag [mm/h]

1: Is een constante met waarde 1 [mm/h]

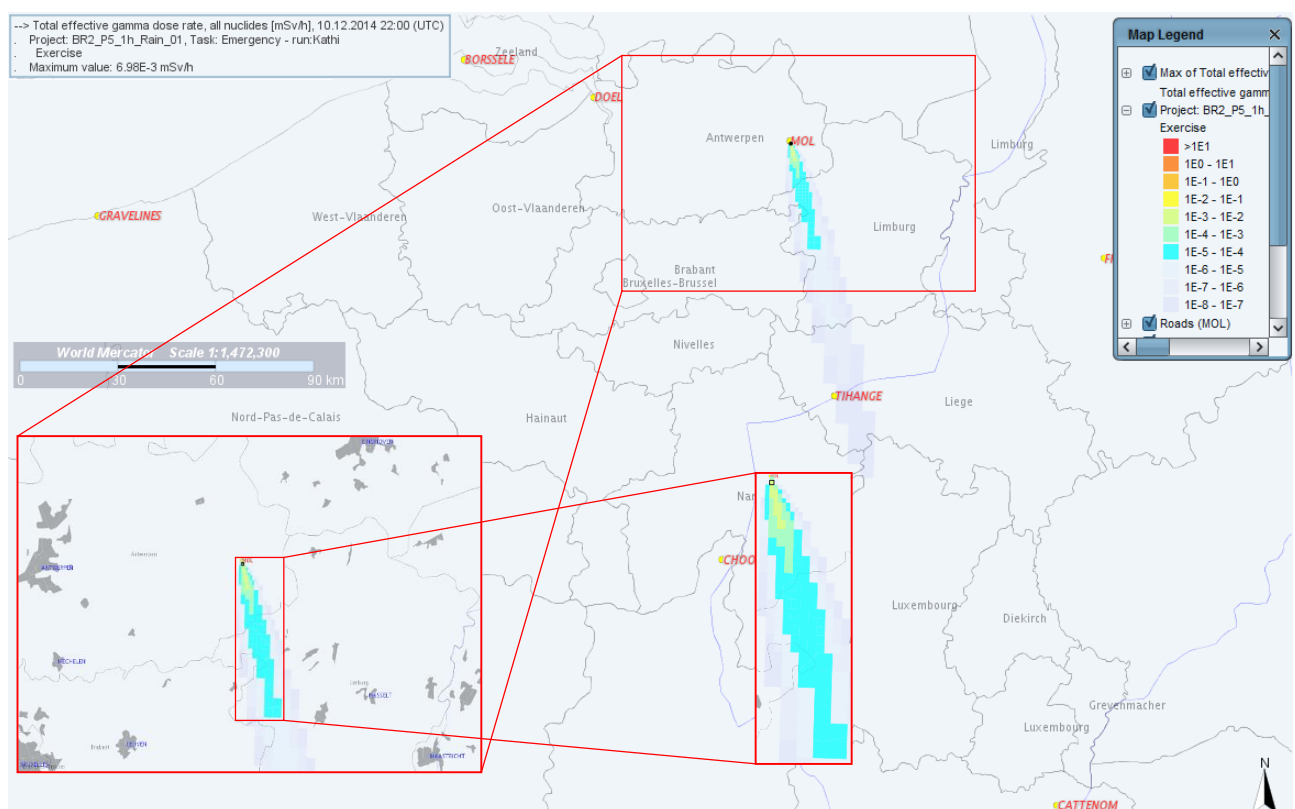
Tabel 1: Waarden voor de factoren voor 'wash-out' per nuclidegroep

Nuclidegroep	a [1/s]	b
Edelgassen	0	0
Aerosolen	8,0·E-5	0,8
Jodia	8,0·E-5	0,6

Op het einde van de stap bepaalt de module dus de totale inhoud van de pluim per nuclide. Deze resultaten slaat ze op om als input te dienen voor de volgende stap. Door deze berekeningen te herhalen voor de volledige beschouwde periode worden ook de totale waarden bepaald. Verder brengt JRODOS waar toepasselijk de gevolgen op langere termijn (tot 100 jaar) na het incident in rekening.

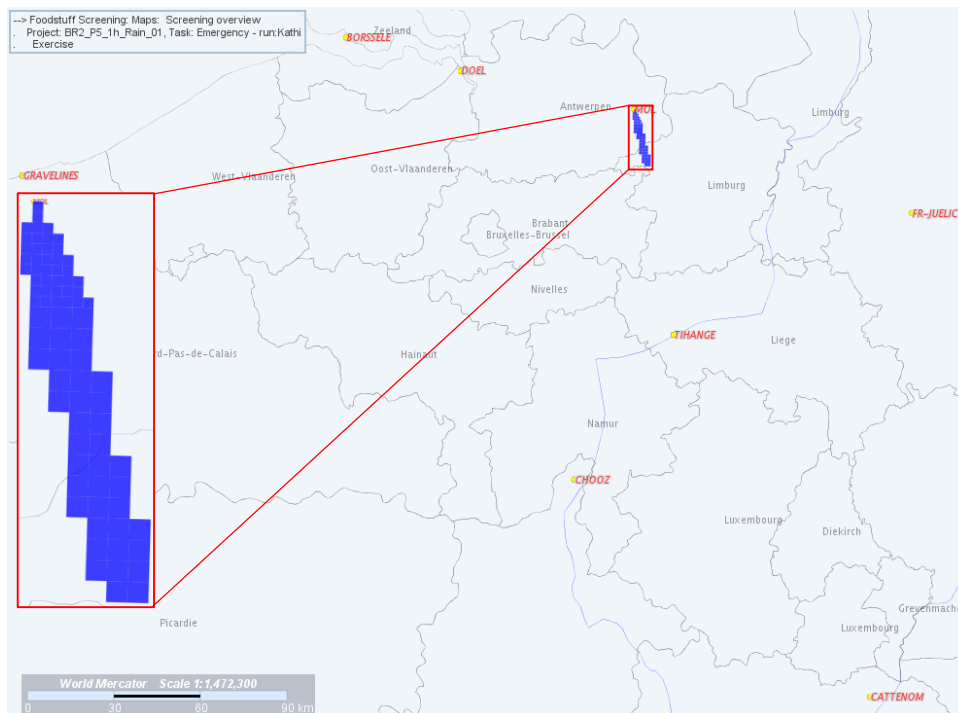
Het volgende voorbeeld verduidelijkt dit. Op basis van de data uit het scenario EL1 met neerslag en een vaste windrichting die getoond wordt in figuur 5 blijkt dat een gebied zuidelijk van de site van het SCK•CEN in Mol een verhoogde waarde voor het dosistempo vertoont. Dit gebied reikt met een lichte afwijking naar het oosten tot Herk-de-Stad. De verhoging is verder amper nog meetbaar en klein ten

opzichte van de normale achtergrondwaarden en zal dus niet boven de gebruikelijke variaties uitstijgen. De kleuren voor deze gebieden zijn vrijwel transparant gemaakt en dus nog amper zichtbaar. De legende toont dat de waarden hier liggen onder de waarde van 10^{-5} mSv/h voor de dosistempo's. Deze waarden zouden in een reële situatie ook geen aanleiding geven tot alarmen of een interventie vereisen. Binnen het eerder aangeduide gebied zal er echter een overschrijding van de detectiewaarden optreden. De kleuren gaan hier fluo blauw, blauwgroen of lichtgroen zijn. De kleuren zoals geel, oranje en rood, die op zeer sterk verhoogde waarden zouden duiden zoals aangegeven in de legende linksboven, komen in deze simulatie niet voor. Om de grootte en de positie van het gebied te verduidelijken is er meermaals op het gebied ingezoomd. Het gebied met de hoogste waarde is zwart omkaderd en omvat de positie van de BR-2-reactor in een zone van 100 op 100 m of 1 hectare. Deze zone bereikt een waarde voor de totale gammadosis tempo van $6,98 \times 10^{-3}$ mSv/h boven de achtergrond. Dit dosistempo meet men 22 uur na het ongeval en de radioactieve wolk is dus reeds geruime tijd weggevaaid.



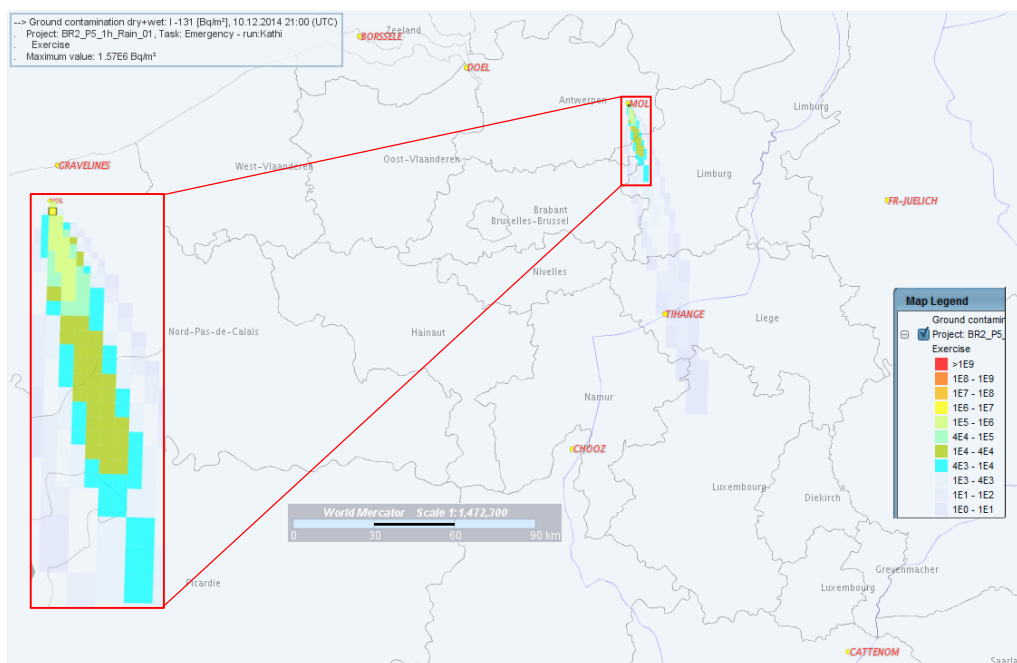
Figuur 5: JRODOS voorstelling van gebied met verhoogde waarden met vergrotingen voor het scenario EL1 met neerslag en vaste windrichting

JRODOS geeft in figuur 6 het gebied weer waarvoor minstens één van de Europese interventiewaarden voor bepaalde voedingswaarden wordt overschreden. Tabel 2 geeft de interventiewaarden voor Europa en België weer waarop deze overschrijdingen gebaseerd zijn. Bij nader onderzoek van de waarden die JRODOS aanlevert, blijkt dat de overschrijdingen op korte termijn gelden voor melk en groenten binnen dit beperkte gebied omwille van de deposities van Jodia. Deze termijn loopt af na 80 dagen. Voor andere producten geldt er geen gebruiksverbod. Ook op lange termijn zijn er geen verbodsbepalingen af te leiden uit deze gegevens.



Figuur 6: JRODOS voorstelling van gebied waar het Europese interventieniveau voor bepaalde voedingswaren overschreden is

Op basis van de Belgische interventiewaarden moet de aflijning van het betrokken gebied gebeuren per nuclide. Hiervoor is de legende in figuur 7 ook aangepast zodat de grenswaarden overeenkomen met de Belgische normen.



Figuur 7: JRODOS voorstelling van gebieden met verhoogde I-131 depositie in Bq/m²

Voor I-131 geven de gezamenlijke gekleurde gebieden weer waar de waarden boven de Belgische interventiewaarde voor melk van 4000 Bq/m² liggen. Het gaat over een gebied met een totale oppervlakte van iets meer dan 94 km². Voor het gebruik van groenten is het gebied uit de zones boven 10000 Bq/m² (in de kleuren kakigroen tot heldergeel) met een oppervlakte van ongeveer 46 km²

verboden. In het beperkte gebied van 14 km² geldt dat alle landbouwproducten ongeschikt zijn voor consumptie. Voor Cs-137 is de maximale waarde 87764 Bq/m² wat boven de interventiewaarde voor alle landbouwproducten ligt. Dit doet zich echter enkel voor op één vlak van 500 op 500 m² of 25 hectare vlak bij de BR-2-reactor. Dit gebied overlapt echter met de gebieden waar door de Jodium-afzetting al maatregelen getroffen zijn en dus zijn bijkomende maatregelen niet nodig. Door de langere halveringstijd van Cesium, zal dit gebied echter langer onder toezicht blijven staan.

Op basis van deze simulaties blijkt het effect dus goed te lokaliseren. De maatregelen zullen toch een belangrijke verstoring veroorzaken. Om de publieke opinie te overtuigen van de correctheid van de maatregelen zal het nodig zijn met bewijsmateriaal te komen dat buiten dit gebied inderdaad geen problemen zullen optreden. Hiervoor zal het nodig zijn om meer meetgegevens te verzamelen. Deze zullen ook een meer overtuigende onderbouwing geven van de besluiten dan een berekening die gebaseerd is op een computermodel. Deze laatste loopt immers nog steeds het risico dat een bepaalde factor verkeerd is ingeschat voor dit specifieke geval. Daarenboven moet rekening gehouden worden met het weer dat een erg grillig patroon kan vertonen. Mogelijks legt de crisiscel rond dit gebied nog een bijkomende perimeter waarin ze bijvoorbeeld de melk of andere producten ‘niet voor consumptie geschikt’ verklaren. Ook zou het kunnen dat men het gebied waarbinnen de maatregelen gelden op basis van gemeentegrenzen bepaalt. Dat alles is echter een politieke afweging en wordt in deze thesis niet meegenomen in de argumentatie.

Tabel 2: Interventiewaarden voor België en Europa per type

Beschermende maatregel	Interventieniveau België (mSv)	
Advies om te schuilen	5–15 (effectieve dosis over 24h)	
Inname van stabiel Jodium	10–50 (zwangere vrouwen en kinderen)	
	50–100 (volwassenen)	
Algemene evacuatie van het gebied	50–150 (effectieve dosis over 7d)	
België		
Acties op voedingsketen nodig	Oppervlaktebesmetting (Bq/m²)	
	Jodium	Cesium
Melk	4000	10000
Vlees	40000	10000
Groenten	10000	6000
Europa (gebruikt door JRODOS)		
Acties op voedingsketen nodig	Oppervlaktebesmetting (Bq/kg)	
	Jodium	Cesium
Melk	500	1000
Groenten	2000	1250

JRODOS geeft zoals eerder vermeld nog een heleboel andere gegevens die het mogelijk maken om de gevolgen voor de omgeving te bepalen. Indien echter de berekeningen niet gedragen worden door meetbare resultaten, zullen deze besluiten niet genoeg kracht hebben om het grote publiek te overtuigen van de noodzaak om de maatregelen te treffen en deze op te volgen. In deze simulatie is uit geen van deze gegevens een indicatie gekomen dat bijkomende maatregelen op korte of lange termijn nodig zijn.

Omdat het JRODOS programma voor dit eindwerk gebruikt wordt op een Windows 64-bits machine, is de installatiehandleiding ook bijgewerkt in het kader van dit werk (zie bijlage A).

De rekenmodule die een belangrijk eindproduct vormt van deze thesis zal de gegevens uit JRODOS interpoleren naar de specifieke meetwaarden voor de gekende of gekozen meetpunten zodat een correcte vergelijking met effectieve meetwaarden kan gemaakt worden. Dit eindwerk gebruikt de omzetting echter ook om de simulatie verder te zetten en een optimale meetstrategie uit te werken. De volledige functionaliteit van de module wordt hierna toegelicht.

3.2 Omwerking van de berekende meetgegevens naar de vaste en mobiele meetpunten

Het doel en nut van JRODOS is hierboven al besproken, maar deze thesis gebruikt nog andere computerprogramma's. Een belangrijk product van deze masterthesis is een berekeningsmodule om gegevens uit JRODOS om te rekenen naar specifieke punten. Deze module maakt echter gebruik van andere programma's die dus ook nodig zijn voor dit proces. Daarom volgt een overzicht van deze programma's.

Excel 2013

JRODOS kan gegevens exporteren naar een Excel - 97-2003 formaat. Om deze te lezen maken we dus ook gebruik van Excel. In dit geval is gebruik gemaakt van de versie Excel 2013. Deze is in staat om de oudere formaten te lezen en bewerken maar kan ook de nieuwere formaten aan. Dit populaire rekenblad biedt ook de mogelijkheid om acties te automatiseren en kan zelfs andere programma's gebruiken en aansturen. Jammer genoeg is dit vermogen beperkt tot de integratiemogelijkheden die deze andere programma's aanbieden.

Surfer

Een programma dat een dergelijke integratie aanbiedt, is Surfer [5]. Dit programma heeft tot doel om driedimensionale gegevens weer te geven. Het kan bv. reliëfs tekenen maar ook op basis van een beperkt aantal punten een interpolatie doen van de verwachte waarden in het betrokken gebied. Deze laatste optie gebruikt de ontwikkelde rekenmodule in de achtergrond.

cConvert

Nog een ander programma dat gebruikt werd, zonder dergelijke interface, is cConvert [6]. Dit programma kan plaats-coördinaten tussen de stelsels 'Belgian Datum', ED50 en ETRS89 en verschillende van hun subcategorieën omzetten. Dit programma wordt niet ingeschakeld in het automatisch deel van de conversie. Het is wel nodig om de coördinaten van de grenswaarden voor het opstellen van de vliegroute in het UTM-formaat om te zetten. Hiermee is een juist vertrekpunt vast te leggen. Een andere mogelijkheid is om gebruik te maken van publiek toegankelijke websites [7] [8]. Hier is de nauwkeurigheid van het resultaat niet altijd even duidelijk of gegarandeerd hoewel dit waarschijnlijk nog steeds zal volstaan voor het beoogde doel.

Google Maps

Google Maps laat toe om resultaten op een kaart te kunnen voorstellen en zo een beter inzicht in de verspreiding te geven. Google Maps is een web-toepassing die de gehele wereld en zelfs de maan en Mars in kaart heeft gebracht én die toelaat om plaatsen op deze kaart te markeren met allerlei symbolen, kleuren en commentaren. Dit laatste kan ook gebeuren door een bestand te uploaden in een specifiek kml-formaat. De module benut deze mogelijkheid door bestanden in dit formaat aan te maken. Het opladen naar Google Maps moet wel nog manueel gebeuren omdat geen andere praktische interface mogelijk is. Deze bestanden kunnen indien gewenst ook ingeladen worden in Google Earth maar het gebruikte formaat is geoptimaliseerd voor gebruik met Google Maps.

Bestandsformaten

Omdat de andere programma's die de gegevens bewerken en interpreteren gewoon zijn om te werken met de formatering van Excel 97-2003 is ervoor gekozen om Excelbestanden wanneer mogelijk in dit formaat te bewaren. Soms wordt teruggegrepen naar het CSV-formaat waarbij een ',' of puntkomma de gegevens scheidt. Het programma cConvert en de uitvoer van Surfer scheiden de gegevens zelfs enkel door spaties. Dit is echter niet het geval voor het Excel-bestand dat de conversies en berekeningen zelf uitvoert. Dit maakt immers gebruik van de technologie zoals die bestaat in deze versie en zou na een downgrade van de Excel-versie mogelijks niet meer volledig werken. Het is ook gebleken dat sommige patches van de huidige versie problemen kunnen geven met de code van de module. In de mate van het mogelijke is de code echter gemaakt om toch te blijven werken na een patch of upgrade. Er kunnen toch nog problemen optreden indien de gebruiker tijdens het berekenen een ander rekenblad selecteert.

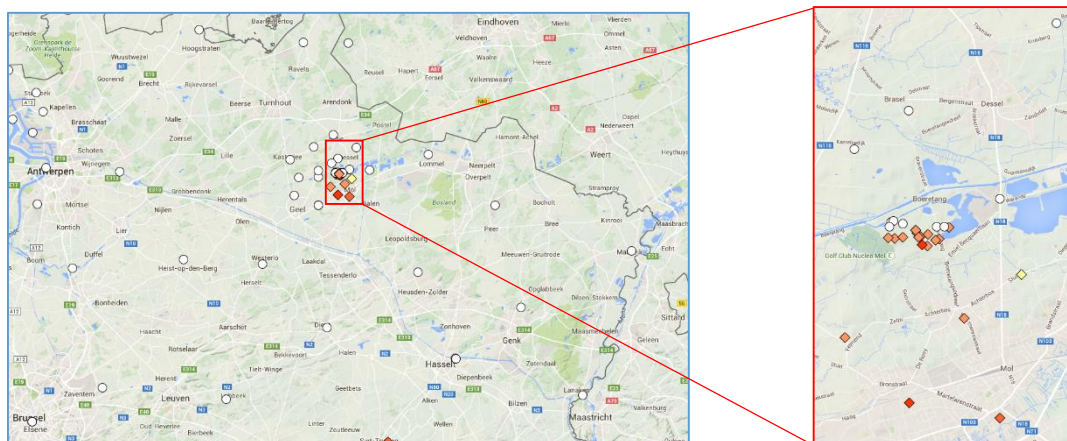
chooseColumn (Export Column-knop)

In eerste instantie is de mogelijkheid om uit de beschikbare gegevens voor een bepaalde tijd de relevante gegevens te halen uitgewerkt in de functie 'chooseColumn'. De functie slaat deze gegevens op in een apart xls-bestand. Surfer gebruikt dit bestand vervolgens om een volledig rooster op te bouwen voor het gebied waarbinnen (voor die periode) een verhoogde waarde is vastgesteld en dit rooster weg te schrijven in een grd-bestand. Deze roostergegevens werden door Surfer daarna in een tekstbestand weggeschreven in het dat-formaat. De module gebruikt deze gegevens op zijn beurt om een interpolatie te maken naar de verwachte waarden van de meetpunten uit een apart bestand, binnen het getroffen gebied. Deze stap verwijdert de punten die buiten het getroffen gebied vallen uit het resultaat om duidelijk te maken waar de verhoging zich voordoet. Deze gegevens staan in een Excel-bestand maar daarnaast zet de deelfunctie 'CreateKML' ze ook om in een kml-bestand om ze voor te stellen in Google Maps. Een voorbeeld van een dergelijke kaart met enkel punten met verhoogde waarden ziet u in figuur 8.

Een kml-bestand mag slechts maximaal 2000 punten bevatten om het te kunnen inladen in Google Maps. Google Earth ondersteunt wel bestanden met meer punten. Dit programma gebruikt dit formaat ook maar vraagt een installatie en verhindert de verspreiding naar het publiek. Indien het aantal punten dit maximum van 2000 punten overschrijdt zal de module een tweede of volgende bestand met punten beginnen.

ConvertToKML (Convert Mask To KML-knop)

Daarnaast is de deelfunctie 'ConvertToKML' om van een set (meet-)punten over te stappen naar een kml-bestand ook apart ter beschikking gesteld. De uitvoer hiervan zal een vereenvoudigd formaat tonen. De punten zonder waarden geeft het weer als gewone witte cirkels. De deelfunctie gebruikt een kleur- en vormlegende om de punten waar een formule met berekening van het maximum of een waarde in de 5^{de} kolom staat, weer te geven. Deze deelfunctie is bruikbaar om een eerste controle te doen of een set van punten voldoende overlap en spreiding vertoont in het gekozen gebied. Ook is ze gebruikt om een andere legende toe te passen op een eerder uitgevoerde berekening.



Figuur 8: Maxima voor Telerad-punten voor scenario EL1 met neerslag en vaste windrichting met merkbare verhoging en ingezoomd op gebied rond BR-2

calculate (Calculate Helicopter-knop)

In het kader van de functie van het SCK•CEN bij het uitvoeren van een noodplan is ook een module ‘calculate’ toegevoegd die een vliegroute bepaalt voor metingen vanuit de lucht. De vliegroute maakt een heen en weer-beweging over parallelle banen binnen een bepaalde rechthoek. Deze rechthoek vertrekt vanaf een gekozen punt en zal bij elke heen of weer beweging parallel met de opgegeven (wind-)richting zijn meetpunten vastleggen. De windrichting is belangrijk omdat de radioactiviteit zich in eerste instantie vooral verspreidt door de wind. Als het toestel steeds loodrecht op de wind beweegt, zal de zijkant van de verspreiding het best afgelijnd worden. [9] Een vliegrichting parallel met de windrichting geeft sneller een zicht op de maximale uitbreiding van de besmetting. In beide gevallen is het mogelijk om de afstand tussen de parallelle vluchten te verkleinen om een betere dekking te krijgen. Dit leidt dan wel tot een mogelijks sterke toename van de af te leggen afstand. Een halvering van de tussenafstand betekent een verdubbeling van de vliegafstand en dus ook van de benodigde tijd. Omdat de afstand bij de eerste verkennende berekeningen vaak op of zelfs boven de voor deze oefening gekozen limiet van 900 km zit voor de helikopter, wordt de tussenruimte redelijk ruim gehouden. Daarna volgt een nauwkeurigere vluchtplanning over het effectief getroffen gebied op basis van deze eerste meetresultaten. De bemanning van de helikopter zou op basis van de meetresultaten voortdurend de lengte van de parallelle banen kunnen aanpassen door slechts verder te vliegen tot zeker geen verhoging meer wordt vastgesteld en dan te keren voor een volgende parallelle vlucht. Dit kan de te vliegen afstand in belangrijke mate verkorten. Dit laatste kan de module niet simuleren. Een rechthoekig gebied zal soms noodzakelijkerwijze het Belgische grondgebied verlaten. In dit werk is de focus beperkt tot de Belgische meetstations van Telerad. Het is dus logisch ook de vluchtpatronen boven buitenslands gebied niet te beschouwen. Dit kan soms ook een verkorting van de uiteindelijke afstand opleveren. In de scenario’s die in deze thesis uitgewerkt zijn, is dit echter meestal niet het geval. Deze scenario’s zijn immers opgezet om een maximaal effect te hebben op Belgische bodem.

Mobiel meettoestel voor helikopter of vliegtuig

Dit kan gebeuren met een helikopter of een klein vliegtuig. Apparatuur voor dergelijke metingen in het kader van het federaal noodplan werd aangekocht door Binnenlandse zaken en staat ter beschikking van het SCK•CEN en het IRE. Het betreft 4x4 liter NaI detectoren waarmee de afgelopen jaren verschillende testvluchten werden uitgevoerd met privé- en leger-helikopters van de types Eurocopter120 en Eurocopter135 en Cessna vliegtuigen van de federale politie. In al deze toestellen kan de apparatuur snel geïnstalleerd worden en zo kan men op korte termijn een relatief groot gebied overvliegen. Het toestel moet steeds op (ongeveer) dezelfde hoogte vliegen om de meest consistente en bruikbare resultaten te krijgen. Een typische hoogte bedraagt tussen de 100 en 150 meter [10]. De

apparatuur maakt elke seconde een meting die wordt weergegeven als een gemiddelde van de voorbije 5 metingen. Dit gebeurt om uitschieters in de metingen in het juiste perspectief te zetten. Dit betekent wel dat slechts om de 5 seconden een 'onafhankelijke' meting gebeurt.

Het toestel moet dan met een constante snelheid van ongeveer 100 km/h over het gebied bewegen. De rekenmodule houdt hiermee rekening maar deze parameter is eenvoudig aanpasbaar. Zo wordt een raster van punten verkregen dat maakt dat de informatie gemakkelijker te interpreteren is. De apparatuur slaat de metingen ook op samen met de bijhorende coördinaten zodat ze bruikbaar zijn voor de bepaling van het dosistempo op grondniveau en de afzetting van individuele radionucliden. Aan deze snelheid heeft de helikopter op basis van eerdere ervaringen een actieradius van ongeveer 300 km tussen tankbeurten.

Parameters voor 'calculate'-deelfunctie

Om een optimale vliegroute uit te stippelen is het dus nodig om het volgende te bepalen:

- wat de ED50 UTM coördinaten van het middelpunt van de eerste heen-beweging zijn;
- wat de lengte is van een enkele heen of weer-beweging;
- hoeveel afstand (in m) moet de functie laten tussen elke heen en weer-beweging;
- wat de afstand zal zijn tussen de uiterste heen en weer-bewegingen;
- op welke tussenafstand tekent de functie een nieuw punt.

De tussenafstanden van de punten zijn ofwel bepaald door de verwachte tussenafstand van de metingen ofwel door de noodzaak om een duidelijk beeld te krijgen op een kaart. Hierbij kan het zijn dat te veel punten de interpretatie van de gegevens eerder verstoren in functie van de gebruikte schaal in Google Maps. Door beperkingen van Excel is het ook niet mogelijk om meer dan 65535 meetpunten te berekenen. Indien dit toch het geval zou zijn, zal de berekening niet starten. De gebruiker kan dan best de afstand tussen de meetpunten vergroten. Deze heeft immers geen invloed op het te volgen traject en verhoogt enkel de graad van detaillering van de punten. De berekeningen bij grote aantallen meetpunten kunnen ook lange tijd duren, dus is het beter deze te beperken.

Deelfunctie ConvertUTMtoLL

Het bepalen van coördinaten van een punt op een specifieke afstand ten opzichte van een ander punt in een gegeven richting kan makkelijker in het ED50 UTM coördinatenstelsel. Dit verdeelt het aardoppervlak in deelgebieden van 500 km breedte op de meridiaan waarbij de coördinaten de afstand ten opzichte van het referentiepunt van dit UTM-deelgebied in noordelijke en westelijke richting weergeven. Omwille van het gebruik van ED50 UTM coördinaten zijn deze resultaten echter niet onmiddellijk voor te stellen in Google Maps of te gebruiken in de andere modules die gebruik maken van de ETRS89 coördinaten. Daarom is de deelfunctie 'ConvertUTMtoLL' toegevoegd. Deze zet de coördinaten om naar geografische lengte- en breedtegraden voor het deelgebied 31U waarbinnen België valt. Deze functie is gebaseerd op het algoritme dat gevonden is op de site van Engineering Toolbox [11]. Hoewel de resultaten van dit algoritme overeenkomen met die van de site, komen ze niet volledig overeen met die van het programma cConvert. Dit algoritme is toch bruikbaar omdat de afwijking kleiner is dan 0,1%. Het programma cConvert geeft immers foutenmarges in de grootteorde van centimeters. De foutenmarges van de berekening die de module gebruikt, zal in de grootteorde van meters zitten. Voor het gebruik dat beoogd wordt, is dit echter geen probleem. De gevonden afwijking is waarschijnlijk te wijten aan afrondingsfouten. Er werd ook gekeken naar de site van de Montana State University [12] maar de berekening hierachter is gelijkaardig. Jammer genoeg geeft geen van beide sites uitleg over de logica achter deze berekening. De rekenmodule neemt deze rekenwijze dus over zonder hier de volledige redenering of logica erachter te beschrijven. Er is wel een beperkte uitleg gegeven op de site van het Nationaal Geografisch Instituut [6]. Dit instituut heeft dan ook het programma cConvert gemaakt. De berekening steunt op de vorm van de aarde (een ellipsoïde) die

aanleiding geeft tot een lokale 'geodetische datum'. Dit steunt op een wiskundige benadering van de vorm van deze ellips. Hierop moet dan nog een correctie naar gelang de locatie gebeuren omdat de aarde geen perfecte ellipsoïde is. Deze logica resulteert in formules die werken met factoren. De nauwkeurigheid van de berekening hangt af van de nauwkeurigheid van de gebruikte factoren. Deze is gedeeltelijk beperkt door de bestaande types van variabelen in Excel en is ook afhankelijk van de bron. Omdat deze variabelen in het geval van cConvert niet gegeven zijn, is de module aangewezen op het gebruik van de variabelen op de site.

PrepareGraph (All Data to graphs-knop)

Vervolgens bestaat er ook een module 'PrepareGraph' die alle gegevens uit het JRODOS bestand verwerkt zoals in de 'chooseColumn'-module en deze samenbrengt in één Excel-bestand. Deze functie zal de meetpunten buiten het resultaatgebied niet verwijderen. Vervolgens zal de functie voor elk van de meetpunten waarvoor resultaten gevonden zijn boven de minimale waarde, een grafiek met de verwachte waarde van deze meetpunten inclusief de achtergrondstraling, toevoegen aan de resultatentabel. Om de relatieve verhoging goed te doen uitkomen, worden het moment voor de eerste verhoogde meting en na de laatste ook meegenomen indien deze binnen het bereik van de berekening uit JRODOS vallen. Alle meetpunten worden in een kml-bestand geplaatst waarbij de meetpunten met verhoogde waarden de gebruikte legende volgen en de andere met witte cirkels zijn aangeduid.

Deelfuncties fillMaskForAll, fillMaskInRange en fillMaskInRangeOfChopper

In eerste instantie was dit proces duidelijk te traag, waardoor een berekening van de gegevens van een vliegroute met meer dan 4000 meetpunten over 48 periodes van een uur soms tot 9 uur rekentijd in beslag nam. De voornaamste reden hiervoor was dat de hulpfuncties 'fillMaskForAll', 'fillMaskInRange' en 'fillMaskInRangeOfChopper' telkens zoeken in de roostergegevens van Surfer naar de vier meest dichtbij gelegen punten van het punt waarvoor ze een waarde interpoleren. De oorspronkelijke benadering gaf weliswaar correcte resultaten maar beschouwde hiervoor altijd alle punten. De huidige benadering gebruikt de eigenschap van de lijst met roosterpunten dat deze gesorteerd zijn door Surfer. Hierdoor zoekt het proces veel sneller en is de tijd van deze stappen in het voornoemde voorbeeld van 9 uur voor deze lijst ingekort tot minder dan 20 minuten.

Deelfunctie AddCharts

Daarnaast maakt dit proces ook met de hulpfunctie 'AddCharts' nog voor elk meetpunt met verhoogde waarden een grafiek met het verloop van deze verhoging. Omdat het aanmaken van grafieken een intern proces is van Excel met behulp van de applicatie-eigen commando's die erg intensief zijn, is het niet mogelijk hierop een verbetering van de performantie te realiseren. Daarenboven legt dit proces in grote mate beslag op het geheugen van de computer. Bij veel punten met meetwaarden zal het beschikbare geheugen voor de toepassing Excel niet volstaan. Daardoor kan de applicatie het proces mogelijk niet voltooien. Een manier om dit te vermijden is manueel het bestand op te splitsen in twee of meer bestanden. Dit is echter een manuele actie die moet gebeuren vooraleer het hele proces te starten. Ook is het afgeraden om meerdere malen de module te gebruiken met grotere bestanden. De Excel-applicatie volledig heropstarten laat soms wel toe een bestand met veel punten tot het einde te berekenen. Een meer gedetailleerde uitleg van verschillende toepassingsmogelijkheden staat beschreven in bijlage B.

Deelfunctie findStyle en gebruikte legenden

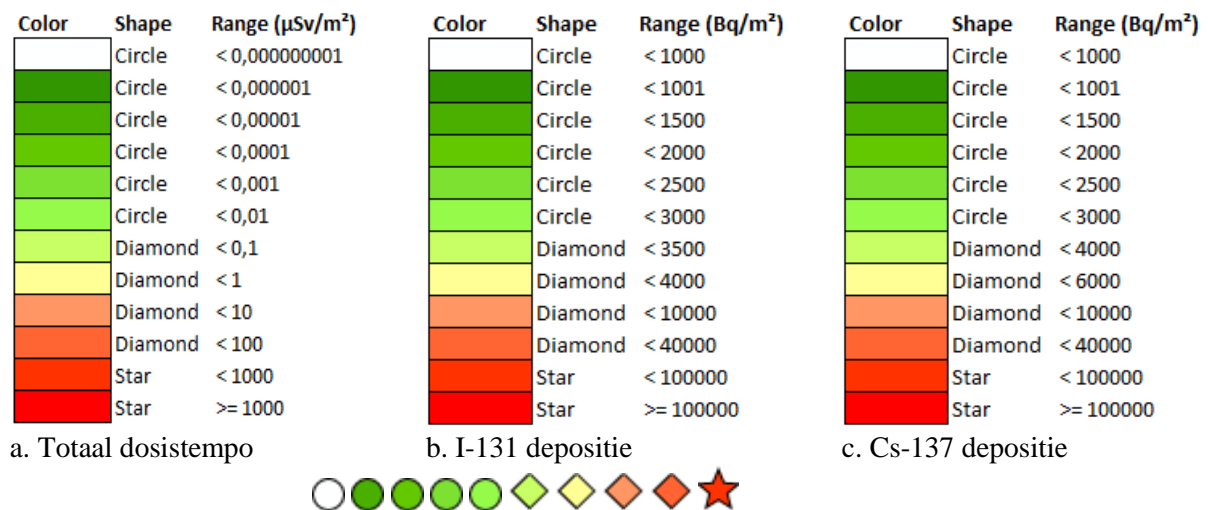
Om de interpretatie van de waarden te vereenvoudigen op de Google Maps voorstelling van de meetpunten, gebruikt de conversie een legende met kleuren en vormen die afhankelijk is van wat men meet. Omdat voor dosistempo's of depositie van I-131 of Cs-137 telkens andere grenswaarden gelden, is voor elk een andere legende nuttig zoals weergegeven in figuur 9. Elk van deze legenden geeft de

kleur en het symbool met de bijhorende grenswaarde.

De dosistempo's gebruiken een logaritmische schaal. De meer belangrijke waarden beginnen vanaf overschrijdingen van de waarde van 100 $\mu\text{Sv/h}$. Hier begint het gebruik van het stervormig symbool. Dit is enkel opgedoken bij het weergeven van de maximale meetwaarden tijdens sommige scenario's gedurende de eigenlijke initiële vrijstelling vlak bij de reactor. Daarom is in deze legende meer plaats vrijgemaakt voor lagere waarden.

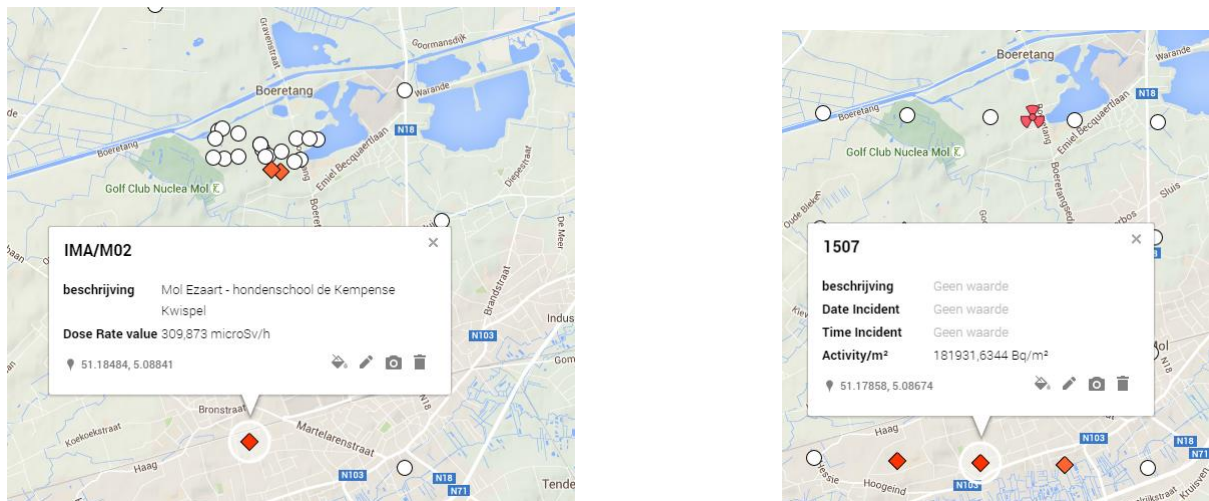
Voor I-131 deposities vallen de belangrijke grenswaarden van 4000, 10000 en 40000 Bq/m^2 samen met herkenbare grenswaarden. Vanaf de oranje ruiten overschrijden de metingen dus de interventiewaarden. De meetpunten met ster-symbolen komen hier wel regelmatig voor en duiden dan ook op problematische overschrijdingen van de limieten.

De Cs-137 deposities gebruiken een sterk gelijkende legende maar de grenswaarden zijn licht gewijzigd. De grenswaarde voor de oranje ruiten is opgetrokken naar 6000 Bq/m^2 omdat dit de geldende grenswaarde voor de eerste interventiemaatregel is.



Figuur 9: Legendes voor omzetting naar symbolen op Google Maps met voorbeelden

Onder de legendes staan ook de voornaamste voorbeelden van de uiteindelijke symbolen. Zoals vermeld is hun betekenis afhankelijk van de context maar in het algemeen zijn de ruit- en de stervormen een aanduiding van plaatsen die verder onderzoek of maatregelen vereisen. De cirkels zijn naargelang van de kleur eerder ongevaarlijke of zelfs onmeetbare overschrijdingen van de achtergrondstraling. Om de informatie te vervolledigen wordt de verwachte/gemeten/gesimuleerde waarde ook meegegeven aan het kml-bestand in een formaat dat kan opgeladen worden in Google Maps. Telerad meetpunten en standaard mobiele meetpunten krijgen hun omschrijving mee. Dit is niet mogelijk voor de punten op de helikopterroute omdat deze geen vooraf vastgelegde positie hebben. Deze punten ontvangen enkel een oplopend nummer bij het opstellen van de route. Indien het echter punten met depositiewaarden voor I-131 of Cs-137 betreft zal de functie hier de activiteit per m^2 in Bq/m^2 tonen.



Figuur 10: Extra informatie getoond bij Telerad meetpunt IMA/M02 en punt 1507 vlakbij BR-2 in Google Maps

Alternatieve vliegpatronen

Voor een helikoptervlucht zijn er nog andere vliegpatronen voor te stellen die mogelijk een kortere vlucht en toch nog voldoende gegevens opleveren. Het besluit kan zijn om de verwachte contour van het besmette gebied te overvliegen. Indien hier nergens een overschrijding van de detectielimiet optreedt, zal het resultaat zo bevestigen dat het gebied niet groter is dan verwacht. Een dergelijk patroon loopt wel het risico om onderbroken gebieden te missen. Die kunnen ontstaan doordat de regenval op het pad van de vlucht lokaal minder was, maar even verder weer heviger. Zoals aangegeven kan neerslag een grote variabiliteit vertonen en heeft dit ook een belangrijk effect op de depositie van radionucliden.

De helikopter zou als alternatief een spiraalbaan kunnen volgen vanaf de oorsprong van het incident. Dit vergt echter een zeer lange vliegtijd en een groot deel van de vlucht levert geen nuttige gegevens op. Immers het gebied tegen de heersende windrichting in zal normaal niet besmet zijn. Een verbetering van het vliegpatroon kan verder zijn om, vertrekkend vanaf de bron van het incident, cirkelsectoren te overvliegen. Indien de middellijn van een dergelijke 'taartpunt' ligt in de heersende windrichting, kan waarschijnlijk de verspreiding goed gelokaliseerd worden. Hierbij zal informatie over de heersende windrichting tijdens het incident van groot belang zijn om een juist patroon uit te tekenen.

Nog een mogelijk vliegpatroon zou zijn om diagonaal over het verdachte gebied te vliegen. Dit zou een snelle manier zijn om te bevestigen dat de algemene richting van de verspreiding van de besmetting klopt.

Tenslotte kan de gebruiker proberen om een gebied af te bakenen dat rekening houdt met de windrichting en een vliegroute uitstippelen dat parallel met of loodrecht op deze windrichting metingen uitvoert. In deze thesis is gekozen om dit laatste patroon te gebruiken. Dit zou de begrenzing beter vaststellen en dus een meer bruikbaar resultaat opleveren. Indien men besluit één van deze benaderingen te implementeren om de berekeningsmodule te verbeteren, gebruikt men best de bijlage C die ingaat op een aantal van de 'interne' functies in de berekeningsmodule.

De volgende stap is de bespreking van de brontermen en de weersomstandigheden die gebruikt zijn voor de cases in deze thesis.

4 Beschrijving van scenario's en weersgegevens

Bij het uitwerken van noodplannen voor nucleaire installaties moeten zoveel mogelijk scenario's beschouwd worden zodat men voor elk relevant scenario een (aan-)gepast actieplan kan voorleggen. Voor de site van het SCK•CEN in Mol zijn verschillende scenario's te bedenken. De hypothetische scenario's, die deze thesis gebruikt, bevatten de vrijstelling van een belangrijke bronterm gedurende 1, 4 of 24 uur en leiden elk tot beperkte beschermende maatregelen. Omdat in dit geval heel wat mensen en middelen moeten gemanaged worden, zal de voorbereiding van een dergelijk scenario beter gedetailleerd moeten worden dan andere, minder problematische scenario's. De extra informatie die dit eindwerk oplevert, zal ervoor zorgen dat het actieplan voor een vergelijkbaar reëel scenario beter onderbouwd is. Aanpassingen en bijstellingen vangen eventuele tekortkomingen van een actieplan dan op.

Om deze scenario's goed te kunnen bestuderen, krijgt JRODOS alle basisgegevens. Dit programma doet een simulatie van dit incident tot 48 uur na de start van het incident. JRODOS berekent de waarden voor 8056 roosterpunten. Deze punten liggen in 5 concentrische vierkantige frames rond de plaats van het incident waarbij de punten elk het middelpunt vormen van een vierkant waarvan de zijde steeds verdubbeld bij elke overgang naar een meer buitenwaarts gelegen frame. De zijde in het binnenste frame kan in stappen variëren van 50 tot 2000 m waardoor de zijde van het grootste frame mee varieert tussen 20 en 800 km. De simulaties in dit eindwerk zijn steeds gemaakt met een maximale zijde van 200 km zodat het Belgisch grondgebied volledig in de scope valt maar de graad van detail toch maximaal is.

Deze gegevens dienen verder als meetwaarden mits interpolatie naar de coördinaten van de Telerad of andere gekozen meetpunten. Deze interpolatie zorgt ervoor dat de kennis van de situatie tijdens de simulatie overeenstemt met de gegevens die beschikbaar zijn tijdens een echt incident.

4.1 Brontermen

Deze thesis werkt met vier vrijstellingsscenario's. Twee daarvan gaan uit van een lek in het reactorgebouw (intern lek) en twee van een lek buiten het reactorgebouw (extern lek). De scenario's verschillen niet enkel in de duur van de vrijstelling. Ook de brontermen zijn verschillend voor elk scenario. De scenario's worden hieronder per soort besproken. De hypothetische scenario's met een intern lek (IL4 en IL24) gaan uit van de volgende situatie (Tabel 3 en tabel 4):

1. Er treedt een lek op in het primaire circuit van de reactor BR-2.
Deze is op het ogenblik van het incident in werking en vertoont een evenwichtssamenstelling die overeenkomt met deze die bekend is van de kerncentrales in Doel.
2. Het lek leidt tot een gedeeltelijk smelten van de kern evenwel zonder het reactorgebouw structureel te beschadigen.
3. Wel treedt de maximaal toegelaten lek van het gebouw op gedurende een periode van 4 of 24 uur. Dit lek is het gevolg van radionucliden die doorheen de muren en normale kieren van het gebouw dringen.
4. In deze omstandigheden wordt uitgegaan van een splijtstofschaade van 50%, waarbij een grote vrijstelling naar het water optreedt.
5. Vanuit het water wordt vervolgens een belangrijk deel van de radionucliden als gas geloosd, zodat een finale vrijstelling van de radionucliden in de binnen-atmosfeer plaatsvindt.

De hypothetische scenario's met een extern lek (EL1 en EL4) gaan uit van de volgende situatie (Tabel 5 en tabel 6):

1. Er treedt een lek op in het primaire circuit van de reactor BR-2.
Deze is op het ogenblik van het incident in werking en vertoont een evenwichtssamenstelling die overeenkomt met deze die bekend is van de kerncentrales in Doel.
2. Het lek leidt tot een gedeeltelijk smelten van de kern evenwel zonder het reactorgebouw structureel te beschadigen. Het lek bevindt zich buiten het reactorgebouw en staat dus in verbinding met de buitenwereld.
3. Het lek treedt op gedurende een periode van 1 of 4 uur. Dit lek is het gevolg van radionucliden die doorheen het lek in het primaire circuit vanuit het gebouw naar de buitenatmosfeer doordringen.
4. In deze omstandigheden wordt uitgegaan van een splijfstofschade van 10%, waarbij een grote vrijstelling naar het water optreedt.
5. Vanuit het water wordt vervolgens een belangrijk deel van de radionucliden als gas geloosd, zodat een finale vrijstelling van de radionucliden in de buiten-atmosfeer plaatsvindt.

Deze vier brontermen worden gecombineerd met verschillende weersomstandigheden. Dit resulteert in een verdere opsplitsing van de mogelijke gevolgen.

Geen van de onderzochte scenario's zou leiden tot een schuilorder of de inname van stabiel jodium. Ook evacuatie zou niet nodig zijn hoewel de plaats van het incident mogelijk wel ontruimd zal worden [13]. Tabel 4 geeft de volledige brontermen voor de eerste 24 uur van het incident weer. Hierbij worden de radionucliden onderverdeeld in nuclidegroepen op basis van hun overeenkomsten in gedrag en effect.

De edelgassen gaan geen interactie aan met andere elementen. Ze zijn chemisch en biologisch inert. Ze dragen niet bij tot inhalatie noch tot grondstraling want ze zetten zich niet af op de grond. Het effect ervan op de mens en het milieu is dus minimaal. Daarom worden ze als minder schadelijk geklasseerd. Als enige betekenisvolle effect van de edelgassen blijft dus de wolkstraling. Deze brontermen worden in deze thesis verder dus niet in detail besproken. De JRODOS-simulatie neemt de wolkstraling wel nog mee om de totale dosistempo's te berekenen en eventuele dochternucliden die via transmutatie in andere groepen terechtkomen, ook in rekening te brengen.

In de groep van de Jodia veroorzaakt I-131 het grootste effect. Dit isotoop heeft immers een beduidend langere halveringstijd dan de andere jodium-isotopen. Daarenboven neemt het lichaam jodium vlot op en slaat het vooral op in de schildklier. Dit betekent dat hier een belangrijke concentratieverhoging van dit isotoop gebeurt omdat het een voldoende lange halveringstijd heeft om opslag in het lichaam te ondergaan. Door de redelijk grote activiteit van I-131 is de kans dan weer groter dat dit op termijn tot schade zal leiden. Dit isotoop geeft voornamelijk β -straling af met een energie van 606 keV gevolgd door γ -straling met een energie van 364 keV. Ondanks dat de straling van I-131 lager in energie is dan de andere Jodia-radio-isotopen, zal dit isotoop door zijn langere halveringstijd meer schade aanrichten in het lichaam. Het JRODOS programma berekent de verspreiding van I-131 dan ook en na export verwerkt de rekenmodule deze data.

Tabel 3: Hypothetische bronterm voor een intern lek in de BR-2 gedurende 4 uur (scenario IL4)

Nuclidengroep	Nuclide	Fractie binnen groep (%)	Bronterm (Bq)	Halveringstijd [14]
Edelgassen			3,95 E+13	
	Kr-85	0,21 %	8,30 E+10	10,76 jaar
	Kr-85m	7,85 %	3,10 E+12	4,48 uur
	Kr-87	7,50 %	2,96 E+12	76,3 min
	Kr-88	15,69 %	6,20 E+12	2,84 min
	Xe-133	58,15 %	2,30 E+13	5,2475 dagen
	Xe-135	10,60 %	4,19 E+12	9,14 uur
Jodia			7,22 E+12	
	I-131	18,25 %	1,32 E+12	8,0228 dagen
	I-132	16,02 %	1,16 E+12	2,30 uur
	I-133	36,06 %	2,60 E+12	20,83 uur
	I-135	29,66 %	2,14 E+12	6,61 uur
Aerosolen			7,10 E+11	
	Cs-137		2,06 E+11	30,08 jaar
	Te-132		5,04 E+11	76,3 uur

Tabel 4: Hypothetische bronterm voor een intern lek in de BR-2 gedurende 24 uur (scenario IL24)

Nuclidengroep	Nuclide	Fractie binnen groep (%)	Bronterm (Bq)	Halveringstijd [14]
Edelgassen			1,53·E+14	
	Kr-85	0,30 %	4,59·E+11	10,76 jaar
	Kr-85m	3,99 %	6,1047·E+12	4,48 uur
	Kr-87	2,03 %	3,1059·E+12	76,3 min
	Kr-88	6,04 %	9,2412·E+12	2,84 min
	Xe-133	79,46 %	1,21574·E+14	5,2475 dagen
	Xe-135	8,17 %	1,25001·E+13	9,14 uur
Jodia			2,4·E+13	
	I-131	28,69 %	6,8856·E+12	8,0228 dagen
	I-132	6,20 %	1,488·E+12	2,30 uur
	I-133	43,30 %	1,0392·E+13	20,83 uur
	I-135	21,81 %	5,2344·E+12	6,61 uur
Aerosolen			4,25·E+12	
	Cs-137		1,23·E+12	30,08 jaar
	Te-132		3,02·E+12	76,3 uur

Tabel 5: Hypothetische bronterm voor een extern lek in de BR-2 gedurende 1 uur (scenario EL1)

Nuclidengroep	Nuclide	Fractie binnen groep (%)	Bronterm (Bq)	Halveringstijd [14]
Edelgassen			2,88·E+16	
	Kr-85	0,18 %	5,18 E+13	10,76 jaar
	Kr-85m	8,38 %	2,41 E+15	4,48 uur
	Kr-87	12,20 %	3,51 E+15	76,3 min
	Kr-88	18,72 %	5,39 E+15	2,84 min
	Xe-133	50,35 %	1,45 E+16	5,2475 dagen
	Xe-135	10,16 %	2,93 E+15	9,14 uur
Jodia			7,88·E+13	
	I-131	16,04 %	1,26 E+13	8,0228 dagen
	I-132	20,81 %	1,64 E+13	2,30 uur
	I-133	33,09 %	2,61 E+13	20,83 uur
	I-135	30,06 %	2,37 E+13	6,61 uur
Aerosolen			2,54·E+12	
	Cs-137		7,35·E+11	30,08 jaar
	Te-132		1,80·E+12	76,3 uur

Tabel 6: Hypothetische bronterm voor een extern lek in de BR-2 gedurende 4 uur (scenario EL4)

Nuclidengroep	Nuclide	Fractie binnen groep (%)	Bronterm (Bq)	Halveringstijd [14]
Edelgassen			2,26·E+16	
	Kr-85	0,21 %	4,75 E+13	10,76 jaar
	Kr-85m	7,85 %	1,77 E+15	4,48 uur
	Kr-87	7,50 %	1,70 E+15	76,3 min
	Kr-88	15,69 %	3,55 E+15	2,84 min
	Xe-133	58,15 %	1,31 E+16	5,2475 dagen
	Xe-135	10,60 %	2,40 E+15	9,14 uur
Jodia			6,45·E+13	
	I-131	18,25 %	1,18 E+13	8,0228 dagen
	I-132	16,02 %	1,03 E+13	2,30 uur
	I-133	36,06 %	2,33 E+13	20,83 uur
	I-135	29,66 %	1,91 E+13	6,61 uur
Aerosolen			2,54·E+12	
	Cs-137		7,35·E+11	30,08 jaar
	Te-132		1,80·E+12	76,3 uur

Bij de aerosolen zal vooral de rol van Cs-137 belangrijk zijn. Dit element is op zich al giftig maar kan ook in het lichaam opgenomen worden in de plaats van zwavel. Het isotoop Cs-137 zal dan als β^- -straler schade kunnen veroorzaken aan de cellen door de veroorzaakte ionisaties. Dit kan op termijn leiden tot een verhoogd risico op kanker en andere beschadigingen van het cel-metabolisme. Door de langere halveringstijd van 30,2 jaar zal de depositie nog jaren meetbaar blijven zoals nu ook nog steeds het geval is voor de bronterm van Cs-137 uit het incident in Chernobyl in 1986.

4.2 Weersomstandigheden

Zowel bij de nuclidengroep van de Jodia als de groep van de aerosolen wordt de depositie sterk beïnvloed door neerslag [3]. In de testberekeningen van JRODOS zijn de neerslaggegevens van de meteorologische mast op het SCK•CEN voor 10 en 11 december 2014 als basis gebruikt (zie ook tabel 7 [15]). De Telerad-metpunten en de mobiele meetpunten bevinden zich enkel op het Belgische grondgebied. De toen gemeten windrichting en snelheid is echter aangepast zodat ook de depositie en de radioactieve pluimen zich voor een groot deel boven het Belgische grondgebied zullen bewegen hoewel de gevolgen zich ook uitstrekken over onze buurlanden. Dit betekent niet dat dit het meest waarschijnlijke incident is, wel datgene dat, indien het zich zou voordoen, de meest ingrijpende gevolgen zou hebben.

De weersgegevens van de meetmast op het terrein van het SCK•CEN geven de meest lokale gegevens zodat de gevolgen op lokaal vlak zo nauwkeurig mogelijk zijn. In de beschreven scenario's is geprobeerd om een snel maar accuraat beeld te geven van de mogelijke gevolgen en te nemen acties. Deze acties zijn beperkt tot een consumptieverbod op verschillende soorten voedingsmiddelen die geproduceerd zijn binnen af te bakenen gebieden. Regenval beïnvloedt deze gevolgen sterk omwille van de uitloging van de radioactieve wolk. Indien de radioactieve pluim overtrekt tijdens een regenbui is het schuiladvies van het grootste belang. Op dat ogenblik zullen immers ook kortlevende isotopen een hoge bijdrage leveren aan de stralingsdosis. Dit effect verdwijnt gelukkig snel en als het schuilorder correct wordt opgevolgd, ondervinden de mensen in het getroffen gebied verder geen invloed.

De weergegevens die gebruikt zijn voor de berekeningen in deze thesis staan in tabel 8. Deze zijn gebaseerd op de gegevens uit de weermast op het SCK•CEN. Deze gegevens zijn zoals vermeld

gemanipuleerd om de simulatie meer betekenisvolle resultaten te laten tonen. Bij ongewijzigde windrichting uit het zuidwesten zou de verspreiding zich voornamelijk in Nederland voordoen met uitlopers tot in Denemarken. Elke natie heeft zijn eigen meetnetwerk op het eigen grondgebied. Voor België is dit het Telerad-netwerk in beheer bij het FANC. Door echter de windrichting volledig uit noordelijke of geleidelijk van noordelijke naar westelijke richting aan te passen is de simulatie meer relevant voor het Belgische grondgebied. Hiervoor zijn 4 periodes ingesteld waarbij elke periode 12 uur duurt. In geval van constante wind zal de windrichting steeds 345° bedragen. In geval van veranderlijke wind zal de wind beginnen vanuit 0° en telkens 30° meer westelijk draaien per periode zodat de laatste periode een volledige westenwind (270°) heeft. Uit de simulatieresultaten blijkt duidelijk dat het gebied waarin de radioactieve depositie plaatsvindt, verschuift nadat de wind in de simulatie van richting verandert.

Tabel 7: Oorspronkelijke weersgegevens van de weermast op het SCK•CEN

Periode	1	2	3	4	5
Vanaf	10/12/14 00:00	10/12/14 04:00	10/12/14 05:40	10/12/14 07:40	10/12/14 09:20
Tot	10/12/14 04:00	10/12/14 05:40	10/12/14 07:40	10/12/14 09:20	11/12/14 09:00
Windrichting [°]	197	200	210	221	330
Windsnelheid [m/s]	9,7	9,8	9,4	8,6	7,3
Regenval [mm/h]	0	1,8	0	0,6	0
Bewolking	Licht	Overtrokken	Licht	Overtrokken	Licht
Stabiliteitsklasse	D	D	D	D	D
Periode	6	7	8	9	
Vanaf	11/12/14 09:00	11/12/14 09:10	11/12/14 13:00	11/12/14 15:30	
Tot	11/12/14 09:10	11/12/14 13:00	11/12/14 15:30	12/12/14 00:00	
Windrichting [°]	0	0	0	0	
Windsnelheid [m/s]	9,2	9,6	10,3	7,8	
Regenval [mm/h]	10,7	0	2,7	0	
Bewolking	Overtrokken	Licht	Overtrokken	Licht	
Stabiliteitsklasse	D	D	D	D	

Tabel 8: Gebruikte weersgegevens voor berekeningen in JRODOS

Weerscenario	Wel of <i>geen</i> regen / Veranderlijke of <u>Vaste</u> Wind			
Periode	1	2	3	4
Vanaf	10/12/14 00:00	10/12/14 12:00	11/12/14 00:00	11/12/14 12:00
Tot	10/12/14 12:00	11/12/14 00:00	11/12/14 12:00	12/12/14 00:00
Windrichting [°]	0 of <u>345</u>	330 of <u>345</u>	300 of <u>345</u>	270 of <u>345</u>
Windsnelheid [m/s]	2	2	2	2
Regenval [mm/h]	10 of 0	10 of 0	10 of 0	10 of 0
Bewolking	Overtrokken of <i>Geen</i>	Overtrokken of <i>Geen</i>	Overtrokken of <i>Geen</i>	Overtrokken of <i>Geen</i>
Stabiliteitsklasse	D of <i>F</i>	D	D of <i>F</i>	D

De verwachting dat stabiele wind en de af- of aanwezigheid van neerslag een bepalende invloed heeft op de eindresultaten, heeft geleid tot het combineren van de twee mogelijkheden voor elk in vier verschillende weerssituaties die in combinatie met de vier eerder besproken brontermen aanleiding geven tot 16 verschillende scenario's. Al deze scenario's zijn uitgewerkt met behulp van JRODOS waarna de simulatiegegevens gebruikt zijn om de verschillen en gevolgen van deze scenario's te

analyseren. Na het exporteren uit JRODOS, past de berekeningsmodule de simulatieresultaten toe op de Telerad en/of mobiele meetpunten. Voor de dosistempo's en de depositie van I-131 blijkt uit het bekijken van de gegevens in JRODOS dat deze vaak de detectielimieten overschrijden. De detectielimieten voor Cs-137 worden vaak niet overschreden. Deze gegevens werden dan ook enkel verwerkt wanneer dit na een controle van de maximale waarden tot bruikbare resultaten zou leiden.

De meetpunten die in eerste instantie beschouwd worden voor de verzameling van gegevens, zijn de vaste Telerad meetstations. Voor al deze punten beschikt het FANC over historische gegevens die een vergelijking mogelijk maken. Daarenboven bestrijken ze het hele Belgische grondgebied. De eerste stations die geen verhoogde waarden boven de gekozen detectielimiet meer vertonen, bepalen de buitengrenzen van het gebied dat verder onderzocht moet worden met een gepaste meetstrategie.

Eenmaal deze buitenranden zijn vastgesteld, legt de berekeningsmodule de meetpunten van de helikoptervlucht vast. Dezelfde berekeningsmodule is daarna ook toe te passen op deze nieuwe punten om hiervoor de 'gemeten' waarden in deze simulatie te simuleren. De verantwoording voor een helikoptervlucht in al de bekeken gevallen staat in een ander deel van de bespreking.

Dit levert dan een goed en gedetailleerd beeld op van de betrokken gebieden zodat maatregelen op een efficiënte manier voor de juiste gebieden genomen kunnen worden. Een duidelijke afbakening van deze gebieden op basis van gedetailleerde meetgegevens die publiek beschikbaar zijn, zal het vertrouwen in een correcte behandeling verhogen.

Hierna volgt de uitwerking van de methode en de argumenten om een meetstrategie als beste keuze naar voor te schuiven. Daarna komt de beschrijving van het gebruik in deze specifieke gevallen.

5 Mogelijke meetstrategieën

Zoals reeds kort vermeld, zullen de experts bij een noodoefening of een incident een keuze moeten maken over hoe en waar zij metingen van de radioactiviteit moet uitvoeren. De verwachte volgorde is dat de groep begint bij de beschikbare gegevens. Dit zijn in eerste instantie de gegevens verzameld door de Telerad meetpunten. Bij sommige noodplanoefeningen en voor deze thesis is uitgegaan van de gegevens zoals JRODOS ze berekende. De rekenmodule bepaalt daarmee de verwachte waarden voor de Telerad meetstations. Op dit punt beschikt de gebruiker dus ook over gesimuleerde Telerad gegevens. Op basis van deze Telerad gegevens bepalen we de volgende stap in de meetstrategie. Men kan achteraf de berekeningen van JRODOS opnieuw gebruiken om na te gaan of deze overeenkomen met de gemeten waarden. Hiermee wordt dan de meetstrategie bevestigd of aangepast indien nodig.

5.1 Detectielimiet en andere criteria

Voor deze thesis is gebruik gemaakt van het gemiddelde dosistempo van het Telerad meetstation in Diest (IMN/M13, Leopoldvest 1) voor de periode 15 en 19 februari 2016. Dit gemiddelde bedraagt $0,0722 \pm 0,0023 \mu\text{Sv/h}$ of $72,2 \pm 2,3 \text{ nSv/h}$. De minimale detectiewaarde is ook afhankelijk van het type van de meting zoals in de tabel 9 hieronder weergegeven.

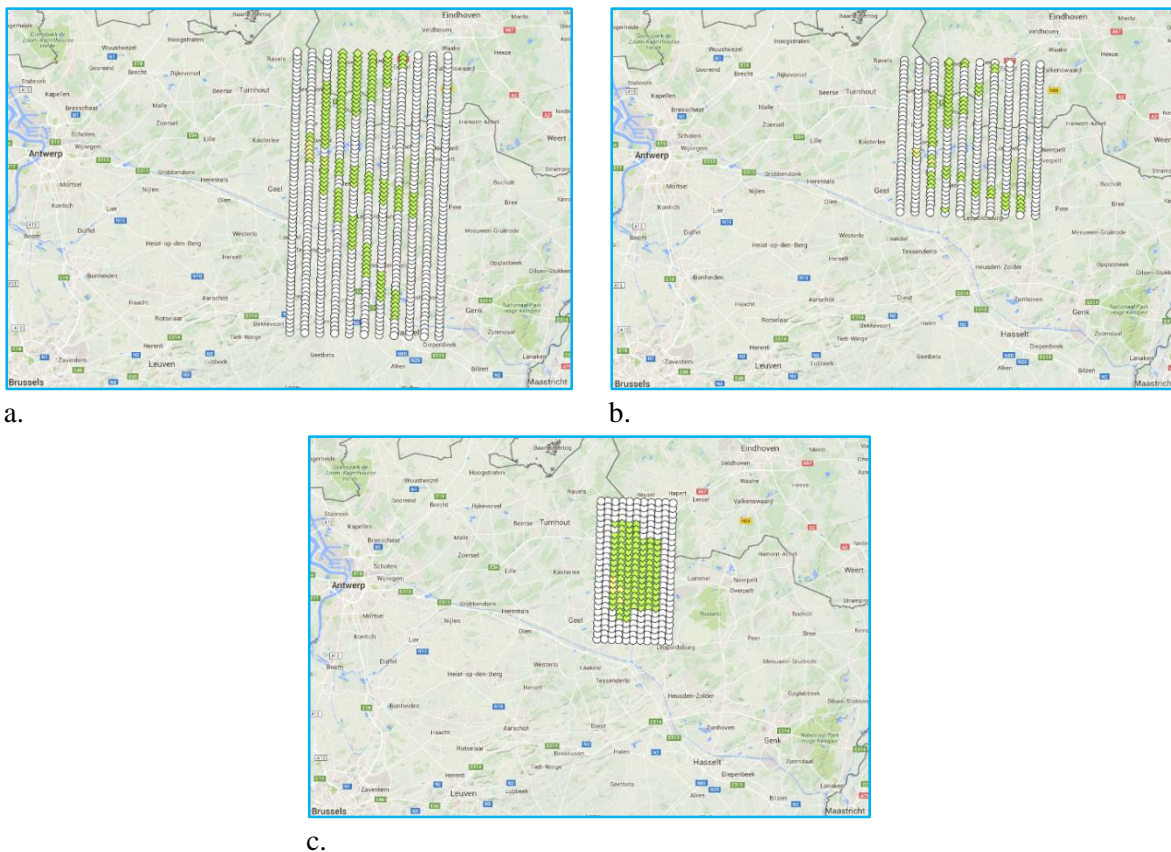
Tabel 9: Minimale relevante detectiewaarde per type

Soort meetwaarden	Minimale beschouwde waarde
Meting voor I-131	1000 Bq/m ²
Meting voor Cs-137	1000 Bq/m ²
Effectief dosistempo	2,4 tot 10 nSv/h

Om tot deze minimale waarden te komen, wordt gekeken naar de gevoeligheid van de 4x4 liter NaI detectoren voor installatie in een helikopter of klein vliegtuig. Deze gevoeligheid ligt op minimaal 1000 Bq/m² voor de hier gebruikte meetmethode [10]. Door deze hoeveelheid om te zetten [16] naar dosistempo's voor de beschouwde isotopen, krijgen we de waarde van 2,4 nSv/h voor I-131 en 3,3 nSv/h voor Cs-137.

Uit voorzichtigheidsoverwegingen zal de bepaling van het mogelijks getroffen gebied zich baseren op de gegevens voor het effectief totale dosistempo. Eerst is de laagst mogelijke detectielimiet van 2,4 nSv/h bekeken. Bij vergelijking is duidelijk dat een kleine verhoging van de minimale relevante detectiewaarden een groot effect heeft op de grootte van het getroffen gebied. Dit wordt aangetoond door de resultaten van het testscenario met de bronterm IL24 en de weersomstandigheden uit Tabel 7. Figuur 11 toont in de delen a, b en c de grootte van de te meten gebieden bij een verhoging van de minimale waarde van het effectief dosistempo van 2,4 (a) naar 5 (b) en vervolgens naar 10 (c) nSv/h wat telkens neerkomt op een verdubbeling. Om de vergelijking tussen verschillende kaarten makkelijker te maken is vaak gekozen voor een kaart met de steden Brussel en Antwerpen als westelijke grens en Maastricht als oostelijke grens. Brussel en Maastricht vormen tevens de meest zuidelijkste punten, terwijl Eindhoven de noordelijkste stad is die meegenomen is. Dit gebied wordt ook met een blauw kader aangeduid in figuur 12. Rond figuren die dit kader aanhouden is in de rest van deze thesis dan ook een blauw kader getekend. We zien dat het gebied met overschrijdingen bij een verhoging van 2,4 naar 5 nSv/h verkleint van ongeveer 27 op 50 km tot 25 op 27 km. Dit komt neer op een vermindering van de oppervlakte van 1350 km² naar 675 km². De zuidoostelijk gerichte pluim geeft dan immers geen aanleiding meer tot een overschrijding van het detectieniveau. Deze was waarschijnlijk het gevolg van de herdepositie van radionucliden nadat de eigenlijke release reeds was

gestopt. Dit hogere detectieniveau laat toe om een veel sneller resultaat te krijgen van de metingen maar kan ook een invloed hebben op de meetstrategie. Immers, indien de te bemeten oppervlakte voldoende klein is, kan een bemeting met de mobiele eenheid reeds volstaan. Toch zal een bemeting van het gebied met de helikopter in dit geval nog steeds het voordeel hebben dat de bereikbaarheid van een punt via de weg niet meespeelt. Voor het grootste gebied zal een tussenafstand van 2700 m neerkomen op een af te leggen afstand van ruim 600 km, wat bij een gemiddelde snelheid van 100 km/h en zonder bijtanken duidelijk boven de actieradius van de gebruikte helikopters is. Het kleinere gebied zal bij een vergelijkbare tussenafstand van de parallelle vluchten nog net binnen deze actieradius vallen. Bij een verdere verhoging van de drempelwaarde naar 10 nSv/h is het betrokken gebied nog verder geslonken tot een gebied van 13 op 25 km of 325 km². Een helikopter kan dit gebied overvliegen met een tussenruimte tussen de parallelle lijnen van 1250 m zonder bijtanken. Een dergelijke vliegroute zal een zeer goede dekking van het getroffen gebied opleveren. Uiteindelijk zal de achtergrondwaarde van 72,2 nSv/h met de bijhorende normale variaties een detectielimiet kleiner dan 10 nSv/h onwaarschijnlijk maken. In de rest van de thesis wordt dus de detectielimiet van 10 nSv/h voor dosistemp'o's gebruikt.



Figuur 11: Grootte van het te bemeten gebied (a) bij 2.4 nSv/h, (b) bij 5 nSv/h en (c) bij 10 nSv/h

Bij het bepalen of aanpassen van een meetstrategie moeten nog verschillende andere elementen in rekening gebracht worden:

- de maximale afstand die het meettoestel kan afleggen (indien deze beperkt is);
- de mogelijke blootstelling van de personen die de metingen uitvoeren;
- de tijd nodig om de metingen uit te voeren en de resultaten beschikbaar te krijgen;
- de betrouwbaarheid en volledigheid van de verkregen data.

Maximale afstand

Bij deze simulaties was de maximale afstand enkel een beperking voor de helikoptervluchten. De vaste meetpunten van Telerad zijn immers niet gebonden aan een afstand en dus is dit geen toepasbaar criterium. De mobiele eenheid kan zich onderweg bevoorraden met extra brandstof en heeft dus ook geen maximale actieradius. Voor het overvliegen van het getroffen gebied bij de laagste detectielimiet was immers een overschrijding van de normale actieradius nodig. De assumptie is gemaakt dat in dat geval de helikopter ofwel het gebied in meerdere vluchten zou opmeten ofwel dat de maximale snelheid verhoogd kon worden door een sneller toestel (zoals een vliegtuig) te gebruiken. Een ander vliegpatroon zoals het kruislings overvliegen of het overvliegen van de rand van het gebied behoort ook tot de mogelijkheden. Deze vluchtpatronen leveren echter niet de kwantiteit aan gegevens op die nodig zijn om een duidelijke afbakening te doen van getroffen gebieden. Het overvliegen van het gebied in een parallel patroon loodrecht op het vorige heeft weinig effect op de duidelijkheid van de afbakening van het getroffen gebied. Wel kan het verminderen van de tussenaafstand tussen de parallelle banen een duidelijkere grensbepaling geven. Dit zal echter zowel de benodigde tijd als de afgelegde afstand evenredig vergroten. Er wordt dus steeds een afweging gemaakt tussen de graad van detaillering en de actieradius of het aantal vluchten. Er is geen inschatting gemaakt van de lengte van alternatieve vliegpatronen zoals het overvliegen van cirkelsectoren en dergelijke omdat deze patronen niet zijn uitgetekend. Bij het uitzetten van de verkennende helikoptervlucht is steeds geprobeerd om maximaal 9 uur te vliegen. Bij de daaropvolgende detailvluchten is geprobeerd om onder de 6 uur te blijven.

Blootstelling van personen

In verband met de blootstelling van de personen die de metingen uitvoeren, zal dit criterium vanzelfsprekend niet van toepassing zijn op de Telerad punten die geen bemanning nodig hebben. De blootstelling van de personeelsleden van de mobiele eenheid is te beheersen doordat zij uitgerust zijn met autonome systemen voor hun bescherming. In echte noodsituaties kunnen zij de bescherming gebruiken, maar men kan zich de vraag stellen of dit toegelaten zal worden indien zich een incident voordoet, waarbij de bevolking in het te meten gebied nog niet is geëvacueerd. Het verschijnen van mensen die, in beschermende kledij, metingen uitvoeren kan immers ongewenste (paniek-)reacties uitlokken. Voor de personen in de helikopter is het duidelijk dat de β -straling niet vanop de grond tot de normale vlieghoogte kan doordringen. Deze zou enkel een probleem vormen bij het doorvliegen van de radioactieve wolk. De simulaties in deze thesis gaan dan ook steeds pas na het overtrekken van de wolk een helikoptermeting laten uitvoeren. Tegen de γ -straling is het niet echt mogelijk een efficiënte afscherming te voorzien. Bij de simulaties vormen de gemeten niveaus niet onmiddellijk een bedreiging voor de gezondheid van de blootgestelde personen op de grond. Bijgevolg loopt het helikopterpersoneel ook geen onredelijk gevaar. Indien de procedure dit niet voorziet, raden we wel aan dat zij ook via een dosimeter opgevolgd worden. Dit criterium zal dus waarschijnlijk geen rol spelen in de bepaling van de meetstrategie.

Tijd nodig voor de metingen

De tijd nodig om de meting uit te voeren is zeker ook van belang. Een korte periode beperkt niet enkel de dosis waaraan personen worden blootgesteld. Snelle meetresultaten laten ook toe om sneller maatregelen te nemen ter bescherming van het publiek indien deze nodig zijn. Het Telerad-netwerk stuurt de gegevens op regelmatige basis door. De mobiele eenheid kan ook op regelmatige tijdstippen de data doorgeven. Daarenboven zijn deze mensen opgeleid in deze materie en zullen ze in staat zijn om abnormale waarden op te merken en deze onmiddellijk te melden. Hierdoor kan hun traject ook bijgestuurd worden indien nodig. De gegevens van de metingen door de helikopter komen pas ter beschikking na de landing. Dit betekent dat men misschien zal kiezen om verschillende

tussenlandingen in te plannen. Deze kunnen dan zowel gebruikt worden om de helikopter opnieuw te bevoorraden met brandstof en om de reeds verzamelde gegevens door te sturen. Het zou dan zelfs mogelijk zijn om de vliegroute te wijzigen op basis van de reeds gekende gegevens. De hoeveelheid gegevens die men tijdens een dergelijke vlucht verzamelt is duidelijk veel groter dan voor de mobiele eenheid. Op basis van dit criterium zal als aanvulling op de Telerad-gegevens bijna steeds gekozen worden voor de metingen door de helikopter. Als de helikopter zich houdt aan een parallel vliegpatroon, kan het echter zijn dat de informatie voor prioritaire plaatsen zoals doorgangswegen of druk bevolkte gebieden die bijvoorbeeld nodig zijn voor de evacuatie van een gebied of die een schuilorder moeten krijgen, te laat binnenkomt. Dan zou het uitsturen van de mobiele eenheid voor metingen op deze cruciale punten een sneller resultaat opleveren. Het is raadzaam dat de experts in geval van calamiteiten met een grote impact op basis van dit criterium een complementaire meetstrategie met metingen door de helikopter én door de mobiele eenheid ook overwegen.

Betrouwbaarheid en volledigheid van de data

Wat betreft betrouwbaarheid en volledigheid heeft het FANC voor het Telerad-netwerk de beschikking over een heleboel historische gegevens die maken dat het gedrag van de toestellen en de normale achtergrondwaarden voor elk meetpunt goed gekend zijn. De mensen die de mobiele eenheid bedienen zijn ook vertrouwd met de apparatuur. Daarenboven zouden dezelfde mensen de verschillende meetpunten aandoen en de verschillende metingen met dezelfde apparatuur uitvoeren zodat een onderlinge ‘kalibratie’ mogelijk is. De gebruikte meetpunten zijn in het verleden ook al vaak gebruikt zodat er ook voor deze punten een basis is om normale achtergrondwaarden op te stellen. De helikoptervlucht wordt ook bij nooddrampoefeningen uitgevoerd. Deze oefeningen leveren, naast de nodige training van het personeel en controle op de procedures, ook weer goede basiswaarden op om te vergelijken in geval van een incident.

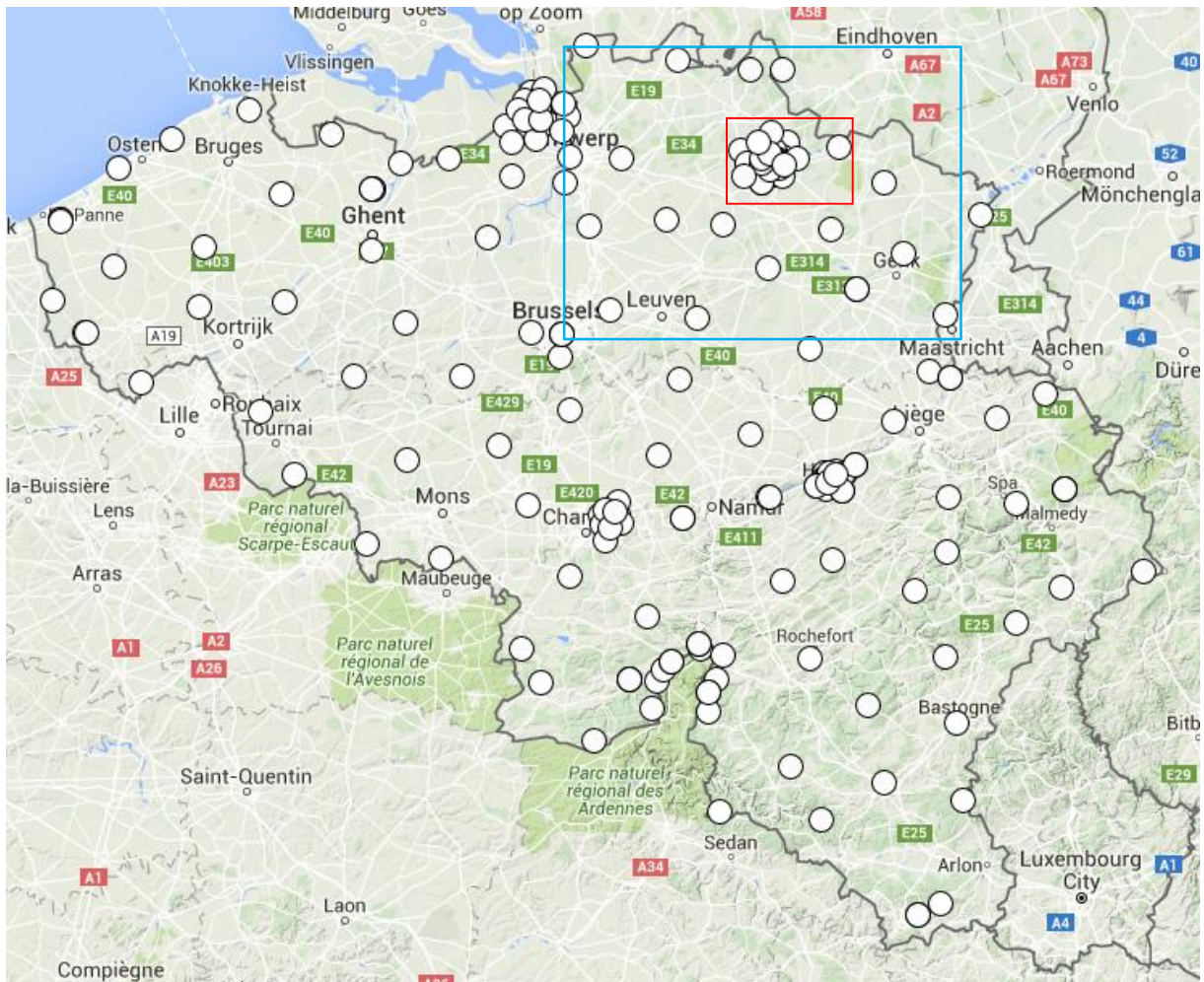
Toch blijft het belangrijk om teams, meetmethoden en toestellen onderling te vergelijken. De toestellen moeten bovendien regelmatig gekalibreerd worden. Tijdens incidenten gebruikt men ook een referentiegebied dat buiten de besmette zone valt om systematische fouten op te sporen. Dit criterium zal enkel van belang zijn indien grote gebieden met voldoende nauwkeurigheid bemeten moeten worden. In dat geval zullen enkel voldoende helikoptervluchten een echt rooster opleveren die een duidelijke begrenzing van de getroffen gebieden mogelijk maakt. In een volgende stap zal de mobiele eenheid dan bodembemonstering en staalnames kunnen doen in en vlak naast het betrokken gebied. De vergelijking tussen de verschillende teams, technieken en toestellen valt echter buiten de scope van deze thesis.

In geval het nucleaire incident aanleiding geeft tot zeer hoge dosistempo's zou het wel kunnen dat de meetresultaten niet meer nauwkeurig zijn door het overschrijden van een aanvaardbare dode tijd bij de metingen. Bij de 4x4l NaI detectoren zullen dosistempo's boven 10-20 $\mu\text{Sv/h}$ aanleiding geven tot onbetrouwbare resultaten. Men kan in dat geval gebruik maken van andere soorten detectoren met een lagere gevoeligheid. Hoewel dit een minder vergelijkbaar beeld geeft van de situatie door het verschil in techniek, zal dit nog wel ruim voldoende zijn om een juiste beslissing te nemen over de nodige beschermingsmaatregelen.

5.2 Definitie van verschillende mogelijke meetstrategieën

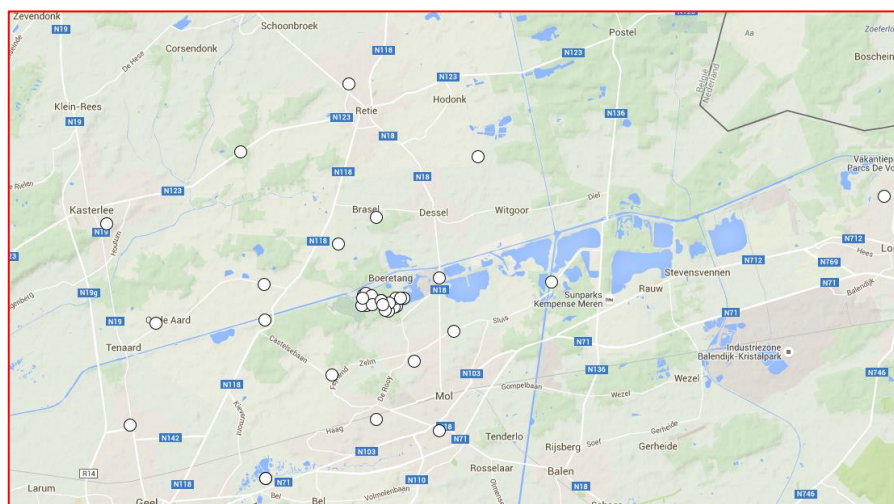
Eerste meetstrategie: Telerad

Het is logisch dat de eerste meetstrategie enkel gebruik maakt van het Telerad-netwerk. Dit bestrijkt met een redelijke dekking het gehele Belgische grondgebied zoals duidelijk is uit figuur 12.



Figuur 12: Situering Telerad meetpunten met aanduiding van gebied in figuur 13 en standaard kadering van kaarten

Op figuur 12 is ook al te zien dat er een grotere concentratie aan vaste meetpunten voorzien is rond nucleaire installaties. Het gebied getoond in de volgende figuur is hier al aangeduid met een rode rechthoek. Figuur 13 toont specifiek de meetpunten in de buurt van de BR-2 en aanverwante installaties.

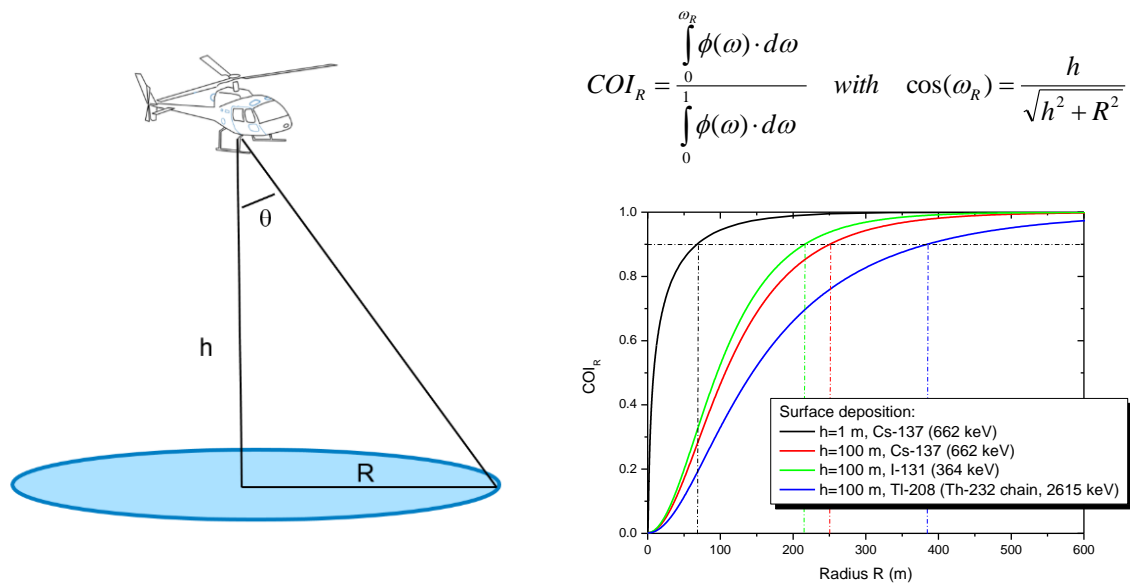


Figuur 13: Situering Telerad meetpunten in de buurt van SCK•CEN

Meetstrategie bij duidelijke overschrijding van normale waarden

De Telerad-punten geven tijdens de simulaties aan dat er een verhoging van meer dan 10 nSv/h optreedt op een bepaald deel van het grondgebied. Dit kan in geval van een incident niet zomaar worden toegeschreven aan een fluctuatie van de achtergrondstraling. De grootte van dit gebied zal de verdere meetstrategie bepalen. Wanneer het gaat over een beperkt deel van het grondgebied rond de plaats van het incident kan het SCK•CEN de mobiele eenheid uitsturen. Bij alle gebruikte scenario's bleek echter dat de radioactieve wolk zich zeer snel verplaatst over een groot gebied en dat de meetpunten dit ook detecteren. Om een gebied af te bakenen dat groter is dan een paar vierkante kilometer zal de doorlooptijd van de metingen met de mobiele apparatuur aan boord van een meetwagen ook al snel te groot blijken. Om de exacte omvang van een betrokken gebied te kennen, is het dus efficiënter het gebied te overvliegen met een helikopter. Indien het dus gaat over een groter gebied of indien de dekking voldoende nauwkeurig moet zijn, zal een helikoptervlucht de meer logische keuze zijn. Zoals verder uitgelegd geeft een helikoptervlucht op een hoogte van 100 m met een afstand van 250 m tussen de vluchtlijnen een volledige dekking van het gebied. Op basis van een dergelijk rooster van metingen kunnen de gepaste maatregelen voor het juiste gebied genomen worden. Om het proces te testen is een eerste testsimulatie uitgevoerd. Bij deze simulatie gaven de Telerad punten aan dat er enkel verhogingen werden vastgesteld binnen een beperkte rechthoek van 9 op 13 km. Indien echter de gebruikelijke concentrisch gelegen punten voor de mobiele eenheid in die buurt ook gemeten zijn, blijkt al snel dat dit gebied uitgebreid moet worden. Daardoor komt het uiteindelijke doelgebied in beeld. Hieruit blijkt dus al dat de bepaling van het getroffen gebied op basis van nieuwe gegevens soms moet bijgesteld worden. Indien hij enkel rekening houdt met de Telerad-gegevens kan een expert besluiten om de mobiele ploeg vanaf de tweede concentrische cirkel slechts een cirkelsector van 180° ten oosten van de BR-2 na te laten kijken tot en met de vierde concentrische cirkel. Bij een overschrijding van de detectiedrempel op de vierde cirkel, die niet verwacht werd uit de resultaten van het Telerad-netwerk, zal de expert het gebied moeten uitbreiden. De keuze tussen het overvliegen van het gehele gebied in een parallel lijnpatroon dan wel het vliegen langs de rand van het waarschijnlijk getroffen gebied lijkt eerder ingegeven door de noodzaak om voldoende gegevens te hebben over de juiste verspreiding van de besmetting dan door een beperking van het systeem. Omdat de beschikbaarheid van accurate gegevens een duidelijke prioriteit blijft, zal eerder gekozen worden voor het overvliegen in een heen-en-weer-patroon. De tussenruimte tussen de parallelle vluchten kan dan nog aangepast worden aan de snelheid of nauwkeurigheid waarmee de crisiscel het gebied wil meten. Zoals al eerder vermeld, zullen zij een afweging maken tussen de noodzaak om een uiterst duidelijke begrenzing op te stellen of een sneller resultaat te hebben.

Afhankelijk van de grootte van het verdachte gebied zal er eerst aan hoge snelheid en met brede tussenruimte (tussen 1 en 5 km) gevlogen worden. Dit levert minder meetpunten per oppervlakte op met een kans om kleine lokale hotspots te missen. De snelheid waarmee de informatie echter binnenkomt, is hier vaak belangrijker dan de informatie die gemist wordt door de lagere resolutie. Nadat op basis van deze gegevens de precieze omvang van het probleem gekend is, zal men een meer gedetailleerde vlucht over het gebied met meetbare verhoging overwegen. Hiervoor zal de snelheid van de helikopter met meetapparatuur lager liggen en de tussenafstand tussen vlieglijnen van 250 m. Uit het werk van Dr. Camps [17] blijkt immers dat 90 % van de waarde van de meting bij een vlucht op 100 m hoogte afkomstig is uit een cirkel met straal 250 m voor metingen van I-131. Dit is schematisch voorgesteld in figuur 14. Omwille van deze vaststelling is het niet nuttig om de vlieglijnen nog dichter bij elkaar te leggen. De metingen zullen immers de volledige oppervlakte afdekken. De formule laat toe om deze 'Circle of Investigation' af te bakenen.



Figuur 14: Helicopterschema met ‘Circle of Investigation’

Uitbreiding van meetstrategie naar de toekomst

In de toekomst zou ook het gebruik van verschillende drones met meetapparatuur op allerlei punten een sterke verbetering kunnen betekenen:

- door het opsplitsen van het gebied over verschillende drones wordt de maximaal nodige afstand per toestel sterk verminderd;
- er worden tijdens de vlucht geen personen blootgesteld aan de te meten straling;
- de totale tijd om de meting uit te voeren wordt ook gedeeld door het aantal deelnemende drones. Indien de drones echter een lagere gemiddelde snelheid hebben, zal de tijd echter weer evenredig toenemen;

De beperking hierbij is echter dat de drones in staat moeten zijn om de meetapparatuur te vervoeren én dat men in staat moet zijn deze over een voldoende lange afstand autonoom of geleid te laten vliegen. De huidige wetgeving die van toepassing is op burgerlijk gebruik laat een dergelijke besturing ook niet toe. Tevens zijn de burgerlijke modellen nog niet voldoende autonoom om bv. een vlucht van 100 km of meer te maken. Mogelijks bestaan er wel drones voor professionele of militaire toepassingen die aan deze voorwaarden voldoen. Eventueel moet gekeken worden naar andere meettoestellen die lichter zijn en toch geschikt voor deze metingen.

Opmerking bij het gebruik van de functie om vliegroutes te bepalen

Zoals eerder aangegeven, bevat de rekenmodule een functie ‘calculate’ die toelaat een vliegroute op te stellen. Deze functie gebruikt intern vlakcoördinaten. Dit maakt het eenvoudiger om de afstanden en de tussenafstanden uit te zetten naar coördinaten. Bij zeer grote dimensies van het gebied moet men soms een correctie uitvoeren omdat de vlakcoördinaten aanleiding geven tot een scheeftrekking in tegenwijzerzin van ongeveer $2^\circ 30'$. Deze afwijking moet de gebruiker compenseren bij het bepalen van de hoek van de vlucht. Deze afwijking zal voor het beperkte Belgische grondgebied niet zo veel variëren naar gelang van de plaats maar voor grotere landen of andere gebieden moet deze afwijking herbekeken worden. Er is even gekeken naar de mogelijkheid om niet te werken met vlakcoördinaten maar enkel met lengte- en breedtegraad. De (tussen-)afstanden zouden dan geconverteerd worden naar een evenredig verschil in lengte- of breedtegraad. Dit zou aanleiding geven tot niet volledig parallel lopende lijnen. Voor kleinere oppervlakken is de afwijking niet zo merkbaar maar voor grotere

afstanden merken we dat voor de uitersten op het Belgische grondgebied de afwijkingen tot 2,76 % in westelijke en oostelijke richting kunnen bedragen ten opzichte van een centraal punt. Voor de uiterste punten is de relatieve uitwijking dus 5 %. Om dit te kwantificeren is er gekeken naar de afwijking in lengte- en breedtegraad die een verschil van 1 km oplevert op verschillende punten in België ten opzichte van het Telerad meetpunt AER/B01. Dit bevindt zich op het dak van het hoofdkantoor van het FANC op coördinaten 50,845042 lengtegraad en 4,359123 breedtegraad. Deze verschillen zijn daarna vergeleken met dezelfde afwijkingen in de uiterste Telerad meetpunten van België in elke hoofdwindrichting. Door de verschillen daarna uit te zetten ten opzichte van hetzelfde verschil in het referentiepunt volgt dat er een afwijking kan optreden tot 0,13 % per kilometer voor de breedtegraad en tot 2,76 % per kilometer voor de lengtegraad.

Als dit effect verwaarloosbaar zou zijn, zou het berekenen van de vliegroute eventueel kunnen gebeuren zonder over te stappen naar vlakcoördinaten. Omdat dit effect slechts op het einde van het project aan bod kwam, is deze aanpak niet opgenomen in de berekeningsmodule hoewel dit misschien wel zou resulteren in een versnelling door het verminderen van het aantal berekeningen. Het uitrekenen van de vliegpunten is echter in geen geval de vertragende stap in het proces en de winst zou dus eerder marginaal zijn. Het is dus verstandig om voor België de gebieden die uitgestrekt zijn in de noord-zuid windrichting te corrigeren met -2,5 graden. Daarenboven is ook gebleken dat het werken met geografische coördinaten misschien beter helemaal achterwege gelaten wordt in verband met problemen met grenswaarden bij de interpolaties.

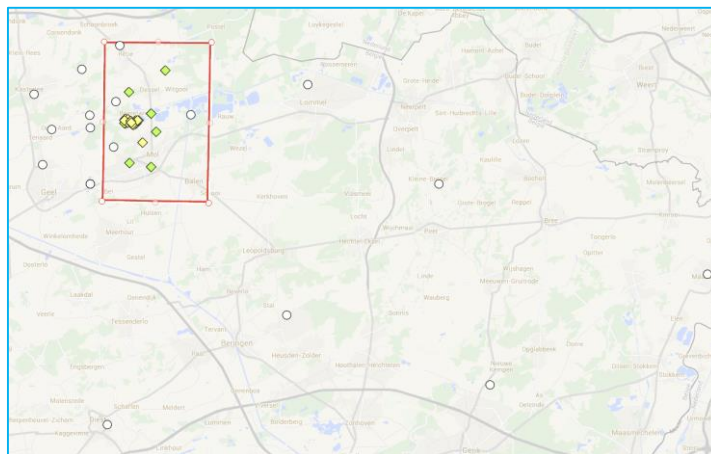
6 Scenario's: resultaten en bespreking

Uit de voorgaande voorbeelden en resultaten volgt dat het bij een ernstig incident niet voldoende is om enkel de gegevens van het Telerad netwerk te hebben. Dit netwerk is immers enkel opgezet om een continue monitoring te doen, niet om een analytische beslissing op te baseren of om het gebied te bepalen waar decontaminatie nodig is. De berekeningsmodule laat toe om zowel helikoptervliegroutes uit te stippelen voor een eerste verkenning van het getroffen gebied als voor een gedetailleerde meetvlucht die een volledige dekking van het getroffen gebied geeft.

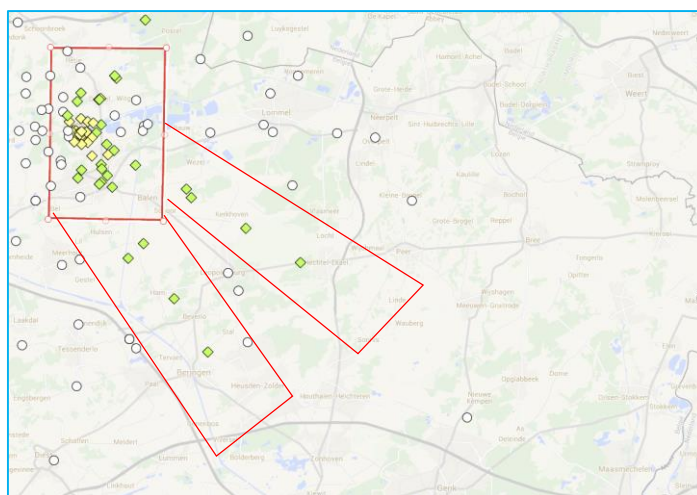
6.1 Resultaten van scenario's

Mogelijke problemen tijdens vastleggen van grenzen van het getroffen gebied

Hoewel de hierboven verder uitgewerkte scenario's meer spectaculaire resultaten opleveren dan het testscenario, bleek uit dat eerste proefscenario dat het Telerad netwerk soms niet voldoende fijnmazig is bij minder grote besmettingen om de richting en uitbreiding van deze besmettingen onmiddellijk correct te bepalen. Immers deze simulatie gaf aan dat een beperking van de zone zoals aangegeven in figuur 15 een deel van het besmette gebied had gemist. Indien men stelt dat een dergelijke bepaling niet het eigenlijke doel is van dit netwerk en dat de bepaling van de zone waar verdere metingen nodig zijn gebaseerd moet zijn op een ander basisgegeven is dit echter geen probleem. Daarenboven is de methode nog aangepast om niet enkel de schijnbare grenzen van het gebied voor de verkennende vlucht te gebruiken maar te gaan kijken naar het eerste punt zonder verhoging. Mogelijkheden voor deze bepalingen zijn de heersende windrichtingen of eerste vaststellingen door het mobiele team. In het testscenario zijn aan de Telerad waarnemingen die van de gebruikelijke meetpunten voor het mobiele team toegevoegd in figuur 16. Hier wordt duidelijk dat twee wolkpluimen niet door Telerad gedetecteerd zijn. Bij het bepalen van het gebied moet men ook met deze mogelijkheid rekening houden. Het helikoptervluchtschema moet hieraan dus aangepast worden. Dit vergroot het doelgebied in dit scenario naar 27 op 50 km of 1350 km². Gezien de grootte van het gebied is het niet efficiënt om extra metingen te doen met alleen de mobiele eenheid.



Figuur 15: Afgebakend gebied op basis van Telerad gegevens



Figuur 16: Telerad en mobiele meetpunten gecombineerd

Gebruikte scenario's

Met behulp van het net besproken testscenario is de berekeningsmodule op punt gesteld. Daarna zijn een aantal scenario's voor incidenten uitgewerkt. In eerste instantie zijn vier mogelijke brontermen uitgewerkt met de volgende referenties:

- Intern Lek gedurende 4h of IL4
- Intern Lek gedurende 24h of IL24
- Extern Lek gedurende 1h of EL1
- Extern Lek gedurende 4h of EL4

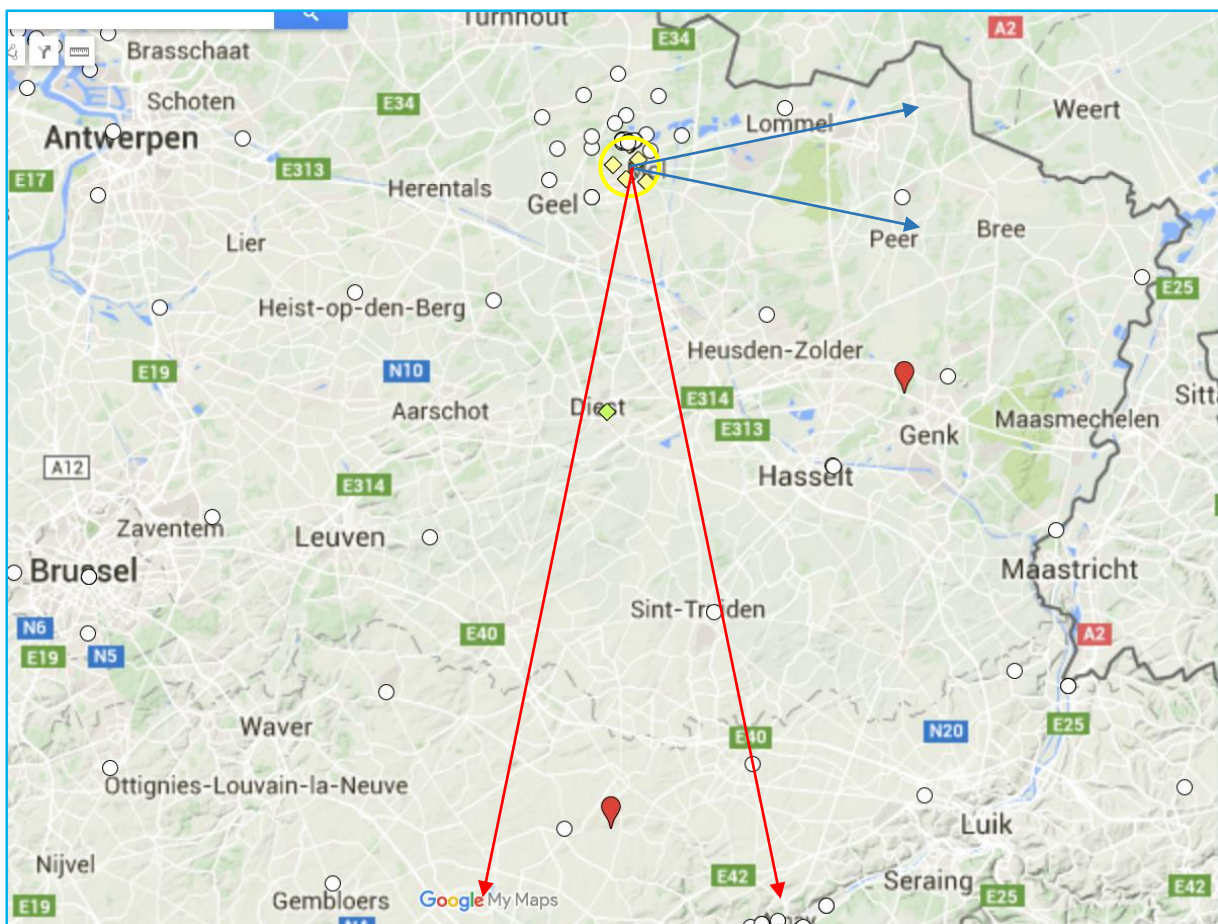
Het verloop en de gegevens hiervan zijn terug te vinden in hoofdstuk 4 vanaf pagina 35 in tabel 3 tot tabel 6.

Daarnaast is gebruik gemaakt van verschillende weersituaties. Zoals gezegd is hier gekozen om twee mogelijke windsituaties én twee mogelijke regensituaties te combineren. Er wordt rekening gehouden met een constante wind uit noord-noord-westelijke richting (345°) wat ervoor zorgt dat de radioactieve wolk zolang mogelijk boven Belgisch grondgebied blijft of met een wind die de eerste 12 uur uit noordelijke richting (0°), vervolgens 12 uur uit noordwestelijke richting (330°), daarna een etmaal uit west-noord-westelijke richting (300°) en tenslotte 12 uur uit westelijke richting (270°) blaast. De bedoeling hiervan was om de radioactieve wolk zo lang mogelijk boven Belgische grondgebied te houden. De windsnelheid is gezet op 2 m/s op een meethoogte van 40 m. Ondanks deze redelijk lage snelheid bleek de radioactieve wolk al snel uit het berekeningsgebied van JRODOS te verdwijnen met de gebruikte maximale uitwijking van 200 km ten opzichte van de bron. Hierdoor verliet de radioactieve wolk het Belgische grondgebied na ongeveer 18 uur. Omdat bij de analyses van de resultaten bleek dat er ook geen significante gevolgen waren buiten België zou het langer volgen van de wolk ook geen verschil meer gemaakt hebben. Wat betreft de neerslag is de beslissing geweest om de beide windscenario's te combineren met een constante neerslag van 10 mm/h of zonder neerslag. Zoals vermeld in de bespreking van het ATSTEP algoritme in hoofdstuk 3.1, zal het voorkomen van neerslag een beduidend grotere depositie en uitloging van de wolk veroorzaken. Droog weer zal de oppervlakte van de verspreiding van de fall-out vergroten. Dit laatste zal op zijn beurt echter ook zorgen voor een veel lagere nood aan beschermende maatregelen. De gekozen neerslaghoeveelheid is erg hoog zodat het effect hiervan erg duidelijk zal zijn. Bij meer realistische scenario's op het SCK•CEN wordt eerder een neerslaghoeveelheid van 2 mm/h gebruikt.

Methode voor het bepalen van de meetstrategie en het toepassingsgebied

Elk van de vier brontermsscenario's is gecombineerd met de vier weerscenario's. Dit leverde dus 16 scenario's op die met JRODOS gesimuleerd werden voor een simulatieperiode van 48 uur. De resultaten van elk van deze simulaties zijn door de berekeningsmodule op de meetpunten van Telerad betrokken waarna de maxima per meetpunt op een kaart in Google Maps werden getoond. Op basis van deze maximale metingen werd in elk scenario een eerste meetgebied afgebakend op basis van de totale dosistempo's. Hiervoor is de volgende methode gebruikt:

1. Bepaal in elke windrichting het eerste punt waar geen waarden boven de detectielimiet gemeten worden. Het gebied binnen een straal van 1 km rond de bron wordt steeds inbegrepen. Indien in een bepaalde windrichting geen punten buiten dit gebied een verhoging vertonen, wordt het eerste punt genomen dat (binnen een afwijking van 5°) in die richting ligt als grenspunt. Als in deze richting wel nog punten met verhoogde waarden zijn, wordt de schijnbare richting van deze uitbreiding gevolgd. Vaak volgt dit dan de richting waarin de wind blaast en is het logisch om een punt te zoeken in deze richting waar geen waarden meer gemeten zijn. Dit is duidelijk gemaakt op figuur 17. De cirkel rond de bron is aangeduid met geel. In het blauw wordt de bepaling van het punt in oostelijke richting aangeduid. Hier komen we dus uit op het Telerad meetpunt IMN/M15 in Kleine-Brogel. In zuidelijke richting gaan we werken met de rode pijlen en komen we uit op het Telerad meetpunt IMN/T01 in Wasseignes.



Figuur 17: Bepaling van eerste grenspunt in oostelijke en zuidelijke richting

2. De overheersende verspreidingsrichting bepaalt de meetrichting die loodrecht staat op deze eerste. Voor grote noord-zuid gerichte gebieden moet hier voor België een correctie van -2.5

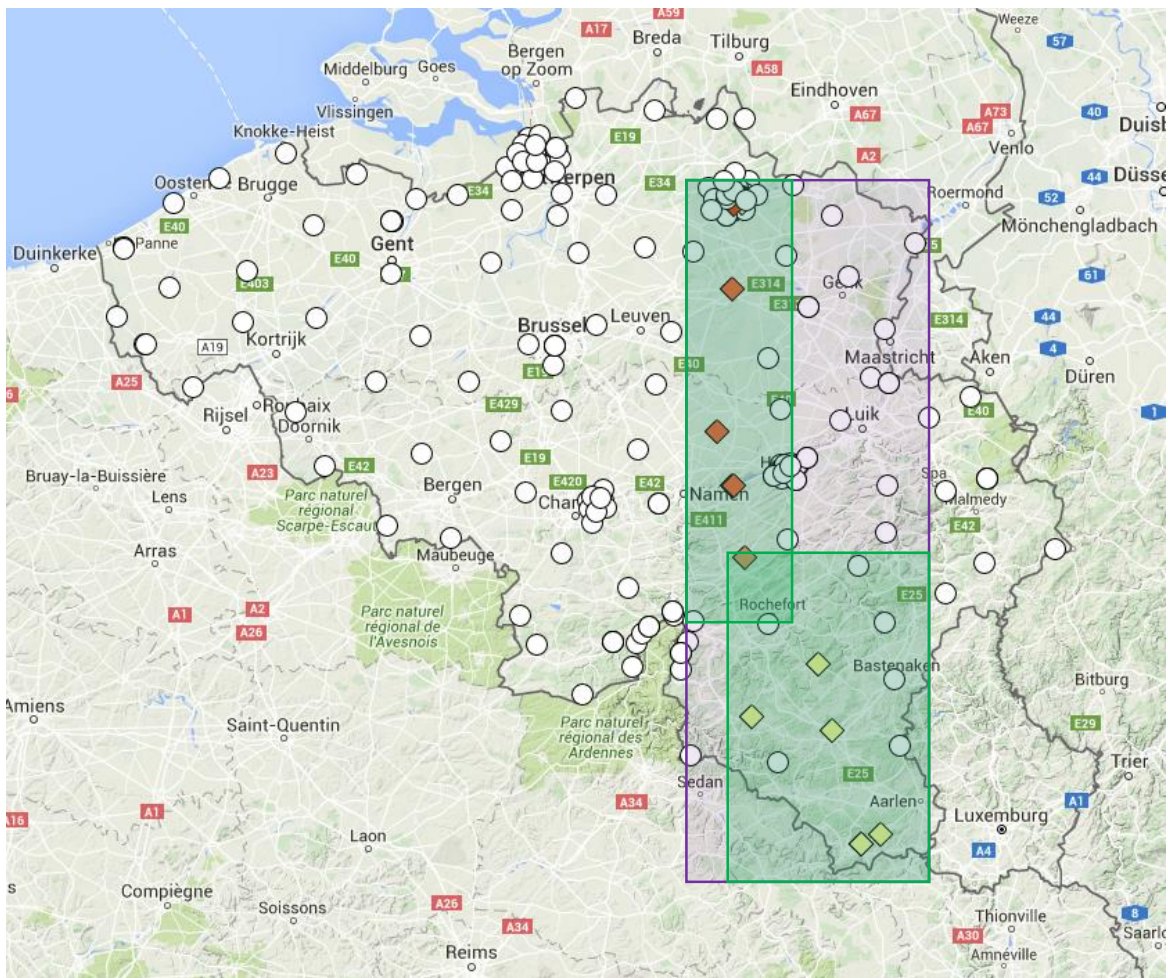
graden gebeuren in verband met de omzetting tussen vlakcoördinaten en geografische coördinaten.

3. De afstanden tussen de tegenoverliggende punten die zo gevonden zijn, bepalen de totale lengte en breedte. Google Maps biedt hiervoor ook een tool aan die afstanden kan meten. Halverwege de eerste vluchtlijn wordt het referentiepunt gekozen. De geografische coördinaten van dit punt kunnen met cConvert omgezet naar vlakcoördinaten waarna de gebruiker de afstanden tussen de meetpunten en de vluchtlijnen kan instellen. Hierbij wordt best rekening gehouden met de totale vliegtijd die bij het ingeven van deze instellingen voortdurend up-to-date gehouden wordt. In de gebruikte simulaties is steeds getracht om de totale tijd niet boven de 9 uren te laten uitstijgen. De ruimte tussen vlieglijnen is gekozen van 1 km tot bijna 5 km. De afstand tussen meetpunten is meestal zo gekozen dat deze kleiner is dan de afstand tussen de vlieglijnen maar voldoende groot om de berekeningen niet onnodig zwaar te maken en toch een duidelijk beeld te geven van de vliegroute.
4. Vervolgens start de berekening van de verkennende helikoptervlucht. Indien er enige twijfel kan zijn over de afbakening, verdient het aanbeveling om dit resultaat om te zetten naar kml-formaat en in Google Maps op de kaart weer te geven. Eventuele correcties kunnen dan op basis van deze controle gebeuren.
5. Wanneer de verkennende helikoptervlucht naar tevredenheid is vastgelegd, kan deze worden uitgevoerd. Bij noodplanoefeningen kan men de berekeningsmodule gebruiken waarbij men een relevant en realistisch tijdstip voor de metingen kiest. De helikoptermetingsimulatie zal zich meestal beperken tot één van de door JRODOS aangeleverde tijden hoewel de vlucht al naar gelang van de totale lengte van de vlucht langer kan duren dan één periode (meestal een uur). De keuze is hier tussen het begin uur en een tijdstip in het midden van de vlucht. Omdat de vlucht meestal pas gebeurt nadat de radioactieve wolk is overgetrokken, levert de keuze voor het begin uur van de vlucht normaal hogere waarden dan een later tijdstip. Dit is het gevolg van de bijdrage aan de dosistempo's van de kortlevende radionucliden. Voor I-131 en Cs-137 is het verschil in functie van de tijd minder belangrijk.
6. De verkennende vlucht geeft een goed beeld van de effectief getroffen gebieden. Op basis van deze gegevens kan een gedetailleerde vlucht dan een waarschijnlijk beperkter gebied meten. Hiervoor wordt een tweede helikoptervlucht uitgestippeld op dezelfde manier als hierboven maar met een tussenafstand tussen vlieglijnen van slechts 250 m en een afstand tussen meetpunten van 50 m of iets meer indien het aantal punten daardoor te groot zou worden. Meer dan 10 000 punten is mogelijk maar neemt veel tijd in beslag bij het bepalen van de te verwachten meetwaarden en het voorstellen in Google Maps. Google Maps heeft daarenboven een beperking van 10 lagen met elk maximaal 2000 punten. Tijdens beide vluchten geeft de spectroscopische analyse van de gegevens een zicht op de bijdrage van zowel I-131 als Cs-137. Er zijn dus geen aparte metingen of vluchten nodig.

In deze thesis is voor elk van de scenario's deze methode minstens gevolgd tot en met stap 5. Stap 6 uitvoeren, gebeurde indien bleek uit de resultaten van stap 5 dat waarden boven de detectielimiet gemeten werden. De vergelijking van de resultaten van deze procedure leert dat de scenario's met regen een beduidend grotere invloed hebben op het Belgische grondgebied. Voor de scenario's waarvoor voldoende indicaties gevonden werden om deze nader te onderzoeken, is ook een simulatie van de resultaten van de meting voor I-131 uitgevoerd. Deze zijn van belang om de maatregelen ter bescherming van de bevolking in te schatten. In de helft van de scenario's zijn tegelijkertijd de Cs-137-metingen ook nuttig. De waarden voor Cs-137 kwamen bijna enkel in de scenario's met neerslag boven de interventielimiet uit.

Verfijning van de meetstrategie bij veranderende windrichting

In enkele scenario's met veranderende windrichtingen zou deze methode een te groot verkennend gebied opleveren om efficiënt te overvliegen. Het gebied (in L-vorm) is dan opgedeeld in twee gebieden die de beide stukken omvatten maar niet de gebieden die verondersteld werden geen relevante metingen op te leveren. Dit leverde een belangrijke vermindering van de benodigde meettijd op die deze opdeling rechtvaardigt. Daarenboven bleek in het tweede gebied geen detectie-overschrijding meer voor te komen op het ogenblik van de meting. Deze werd enkel overschreden tijdens het overtrekken van de radioactieve wolk maar zorgde voor onvoldoende depositie om verdere maatregelen te verantwoorden. De figuur 18 hieronder toont de meting van Telerad met in het paars het gebied indien slechts één rechthoek gebruikt wordt om dit af te dekken en de beide groene gebieden nodig om de getroffen gebieden af te dekken met minder dan twee derde van de totale oppervlakte.



Figuur 18: Afdekken van L-vormig gebied met twee rechthoeken

6.2 Bespreking van de resultaten van de scenario's

Vergelijking van de maatregelen per bronterm

Bij het vergelijken van de verschillende scenario's, valt het op dat bij de twee brontermen waarbij het lek zich voordoet in het reactorgebouw de reikwijdte van de gebieden waarvoor bijkomende maatregelen genomen moeten worden, beperkt is. Daardoor moet ook een kleiner gebied gemeten worden. Zowel scenario IL4 als IL24 omvatten uiteindelijk gebieden onder de 500 km² met een maximale vliegtijd van 9 h voor een gedetailleerde meting. Hieruit blijkt dat de gevolgen voor deze

scenario's ook gemakkelijker te beperken zijn door maatregelen zoals het vernietigen van melk uit het gebied met een Jodium-activiteit hoger dan 4000 Bq/m², van groenten boven de 10000 Bq/m² of zelfs vlees bij waarden boven 40000 Bq/m². Voor Cesium-activiteiten gelden de limieten van meer dan 6000 Bq/m² voor groenten en meer dan 10000 Bq/m² voor melk en vlees. De oppervlakten waarvoor deze verschillende maatregelen nodig zouden zijn staan in tabel 10 opgesomd samen met de overvlogen oppervlakten. Hieruit blijkt dat slechts in scenario's met neerslag ook Cesium besmettingen voorkomen. Uit de verdere bespreking blijkt waarom dit toch van belang is, hoewel het gaat over gebieden die ook vallen onder de maatregelen voor I-131 besmetting.

Tabel 10: Maatregelen voor verschillende scenario's

Scenario Bronterm /Neerslag/Wind	Opp. eerste vlucht (km ²)	Opp. Voor Gedetailleerde Vlucht / Maatregelen (km ²)						
		I-131				Cs-137		
		vlucht	melk	groente	vlees	vlucht	groente	melk+vlees
IL4/Droog/Vast	2640	37	5	2	0,1			
IL4/Droog/Variabel	2184	50	5	2	0	6		
IL24/Droog/Vast	1967	192	13	7,5	2	10	0,14	
IL24/Droog/Variabel	4164	100	14	7	2			
EL1/Droog/Vast	6231	472	35	16	6			
EL1/Droog/Variabel	2775	519	46	16	7			
EL4/Droog/Vast	1626	475	37	18	8			
EL4/Droog/Variabel	2568	495	55	16	6			
IL4/Neerslag/Vast	1377	128	15	10	2	128	5	0,35
IL4/Neerslag/Variabel	1851	80	16	11	2	120	3	
IL24/Neerslag/Vast	994	439	78	39	9	120	13	10
IL24/Neerslag/Variabel	1940	321	87	31	16	70	19	13
EL1/Neerslag/Vast	6000	428	92	54	11	48	10,5	8
EL1/Neerslag/Variabel	2151	392	99	58	12	44	11	8
EL4/Neerslag/Vast	2860	502	79	49	15	80	10	7,5
EL4/Neerslag/Variabel	2523	329	94	57	18	48	11	8

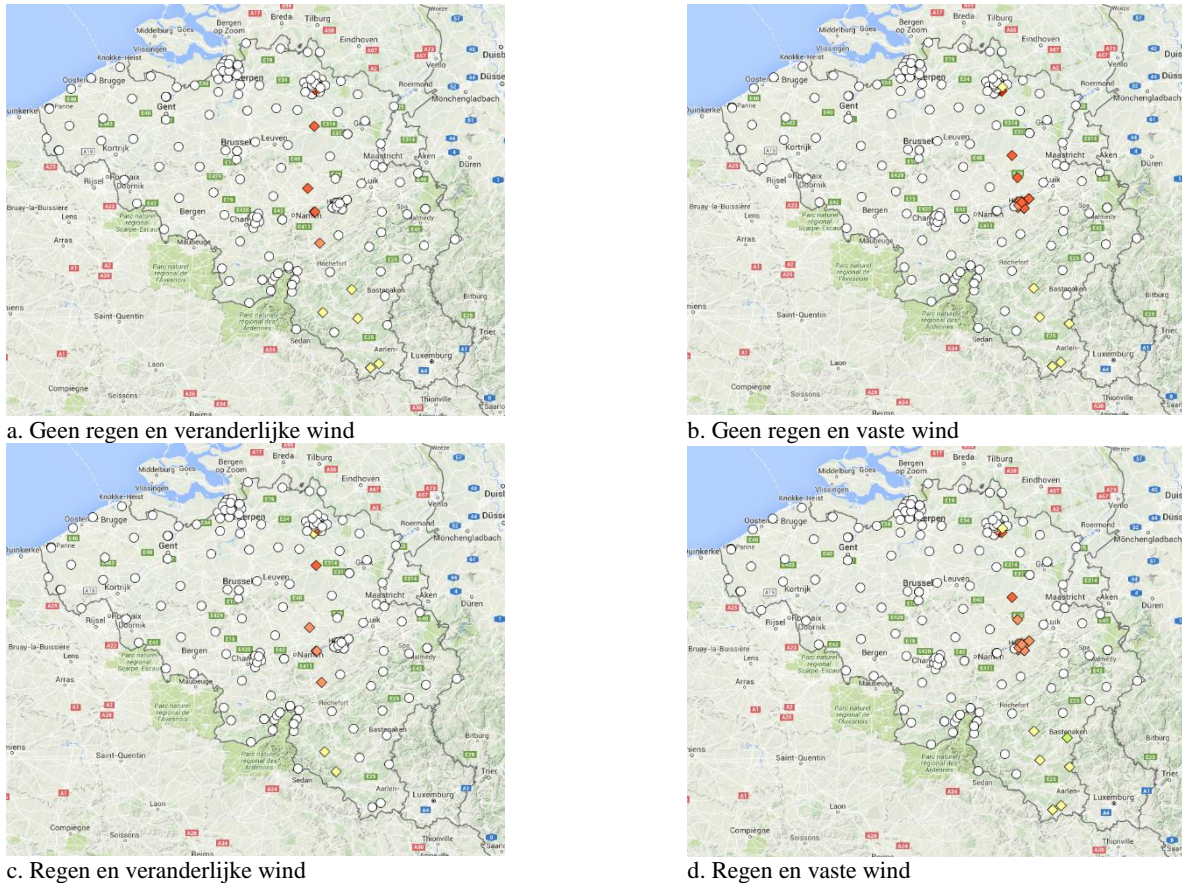
Bij de vergelijking tussen de simulaties met en zonder neerslag, blijken de oppervlakten waarvoor maatregelen nodig zijn, steeds groter in geval van neerslag. Dit is een gevolg van de deposities door een sterkere uitloging van de radioactieve wolk. De oppervlakten waarover de gedetailleerde vlucht wordt uitgevoerd, zullen meestal kleiner zijn. Dit komt omdat de uitloging zorgt voor een sterkere concentratie van de depositie. Een veranderlijke wind zorgt ook voor een grotere initiële oppervlakte. De wind is immers de voornaamste 'motor' van de verspreiding van de radioactieve wolk. Soms was het mogelijk en nuttig om de oppervlakte op te splitsen in 2 rechthoeken, maar vaak was dit niet nodig. Na een maximale afstand van ongeveer 50 km was de depositie beperkt. Na het overtrekken van de radioactieve wolk vindt daar geen meting boven de detectiewaarden meer plaats.

Voor de Cesium-deposities blijkt dat de oppervlakten voor detailvluchten en interventies veel kleiner zijn maar door de langere vervaltijden zullen de maatregelen veel langer in stand gehouden moeten worden. Als voorbeeld voor dergelijke maatregelen kan de huidige 'verboden' zone rond Chernobyl dienen. Indien de waarden voldoende hoog zijn, wat voor sommige van de gebruikte scenario's het geval is, zal de zone tot 120 jaar boven het interventieniveau blijven. Dit betekent een grote belasting op de omgeving en zal de interventiekosten zeer hoog maken. Vermoedelijk moeten de gronden onteigend en indien mogelijk gedecontamineerd worden. Om te weten of decontaminatie mogelijk en

nuttig is zullen staalnames nodig zijn. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van de mobiele meeteenheid die de nodige uitrusting en expertise bezit.

Vergelijking van de maatregelen per weersomstandigheid

Om het effect van de weersomstandigheden in detail te vergelijken kunnen we uitgaan van éénzelfde bronterm met de verschillende weerscenario's. Hieronder staan de maximale meetwaarden over de periode van 48 uur in Telerad meetpunten voor de bronterm van EL1 in figuur 19.



Figuur 19: Maxima van Telerad meetpunten voor dosistempo's in bronterm EL1 in verschillende weersomstandigheden

De maxima liggen duidelijk hoger indien er geen neerslag is. Het hoogste maximum ($> 900 \mu\text{Sv/h}$) is te wijten aan het meetpunt IMA/MO2 (Mol Ezaart - hondenschool de Kempense Kwispel) 3,48 km zuidelijk van de positie van de BR-2 reactor. Bij regenval zal waarschijnlijk de depositie al gedeeltelijk gebeuren vóór dit punt zodat de waarde hier iets minder extreem is (321-309 $\mu\text{Sv/h}$). De maximale waarde is voor dit scenario beperkt tot het moment van het overtrekken van de radioactieve wolk gedurende het eerste uur. Daarna valt deze waarde pijlsnel terug tot minder dan $5 \mu\text{Sv/h}$, waarbij de terugval minder uitgesproken is in het scenario met regen dan dat zonder. Dit lijkt veroorzaakt doordat de meetwaarde in het tweede geval voornamelijk te wijten is aan de straling door de overtrekkende wolk en in het scenario met neerslag ook voor een belangrijke deel veroorzaakt wordt door de depositie. Dit patroon blijkt zich ook te herhalen voor de verder verwijderde punten: een hoger maximum tijdens het doortrekken van de radioactieve wolk zonder regen en een snellere terugval. Indien er wel neerslag is tijdens het doortrekken van de radioactieve wolk meet men een hogere depositie met lagere maxima. Omdat de wind bij een vaste windrichting toevallig pal over de site van Tihange trekt, zijn er in de scenario's met vaste windrichting veel meetpunten met een verhoogd maximum. Op en rond deze site zijn immers meerdere meetstations gevestigd. Bij een veranderlijke

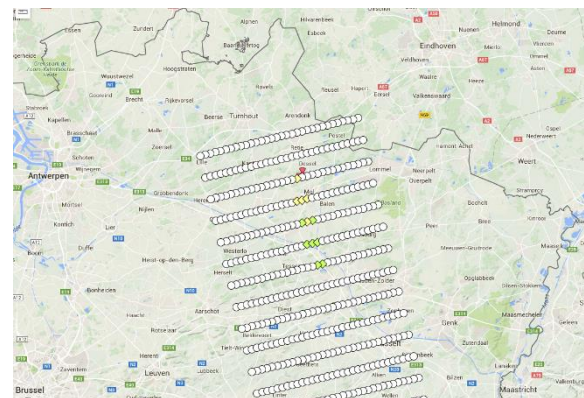
windrichting zal de radioactieve wolk eerst zuidwaarts bewegen en deze site ten westen passeren zonder daar de detectielimieten te overschrijden. Dit toont aan dat de zijdelingse verspreiding bij stabiele weertypes beperkt is. Geen van de uitgewerkte scenario's bevatten meer instabiele winden. De verwachting is dat de wolk dan sneller in de breedte zou uitwaaiëren en ook over een groter gebied een lagere dosis zou afleveren. De noodzaak aan interventies daalt hierdoor maar de oppervlakte waar men de wolk waarneemt, stijgt.

Uitwerking voor dosistempo in voorbeeldscenario

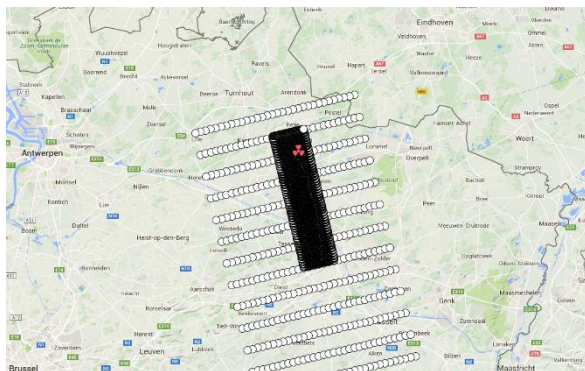
Door dieper in te gaan op de metingen van dosistempo's voor het scenario met een extern lek gedurende 1 uur, wordt de verkennende helikoptervlucht genomen zoals aangegeven in het eerste deel van figuur 20. De verkennende helikoptervlucht levert dan weer gegevens op voor een verdere aflijning van de meer gedetailleerde helikoptermeting zoals getoond in delen b en c. Dit leidt dan tot de meetresultaten zoals getoond in deel 4, waarbij alle waarden onder de interventiewaarden blijven. Dit scenario geeft dus op basis van de dosistempo's geen problemen die een interventie vragen. De maximale dosistempo's in deze meting liggen rond 1,5 µSv/h.



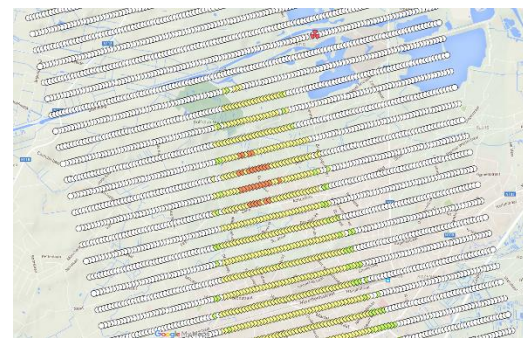
a. eerste helikoptervlucht



b. detail van eerste helikoptervlucht met gemeten verhogingen



c. gedetailleerde helikoptervlucht over vorig beeld



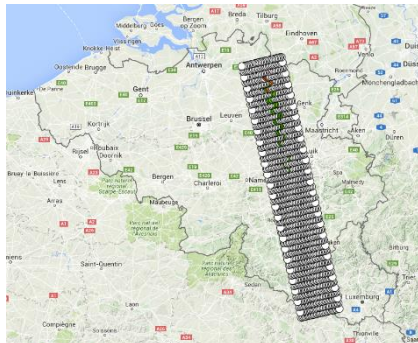
d. detail van tweede vlucht met verhoogde meetwaarden

Figuur 20: Detaillering van EL1 zonder regen en veranderlijke wind voor dosistempo's

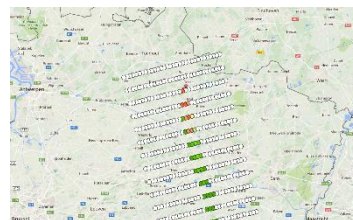
Uitwerking voor I-131 in voorbeeldscenario

Voor hetzelfde scenario zijn ook deze stappen genomen om de depositie van I-131 te kwantificeren. Figuur 21 toont dat ondanks het feit dat er geen overschrijding verwacht wordt voor de dosislimiet dit wel degelijk het geval is voor de I-131 waarden. Voor een gebied van 46 km² (alle licht- of donkerrode tekens) zal de geproduceerde melk vernietigd moeten worden tot de waarden voldoende gezakt zijn. Voor twee kleinere niet verbonden gebieden hierbinnen met oppervlakten van 13 en 3 km² zullen ook

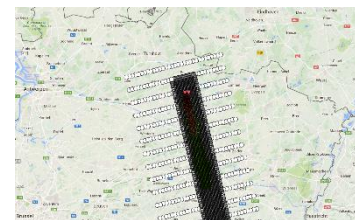
de groenten niet vrijgegeven worden voor consumptie. Voor een kerngebied van 7 km² zullen alle landbouwproducten, dus ook het vlees, niet in de handel gebracht mogen worden. De volledige grafische resultaten van de gedetailleerde vlucht staan in figuur 22.



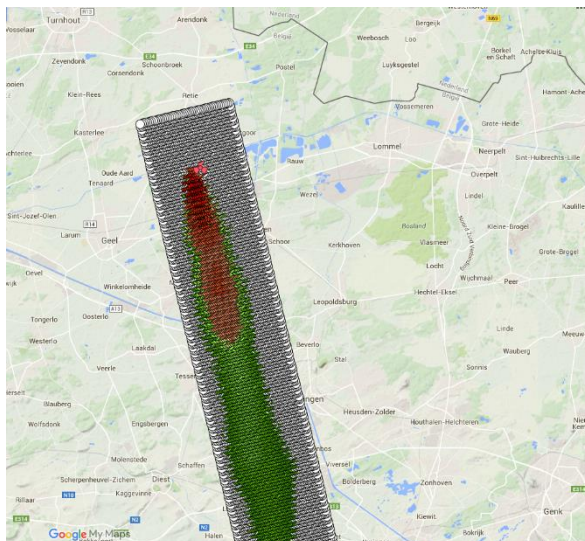
a. verkennende helicoptervlucht



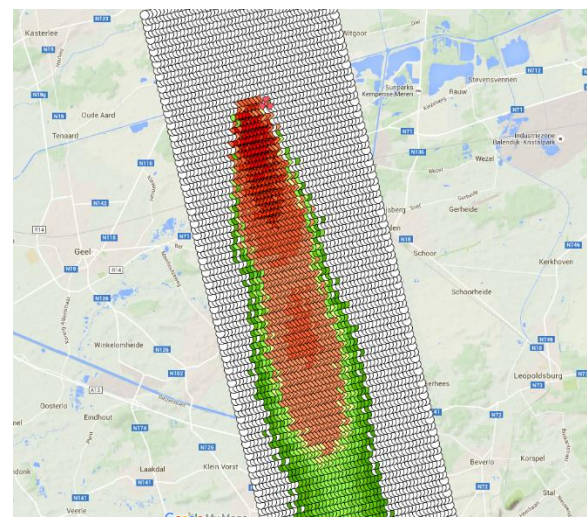
b. detail verkennende vlucht



c. deel van gedetailleerde vlucht over voorgaande kaart



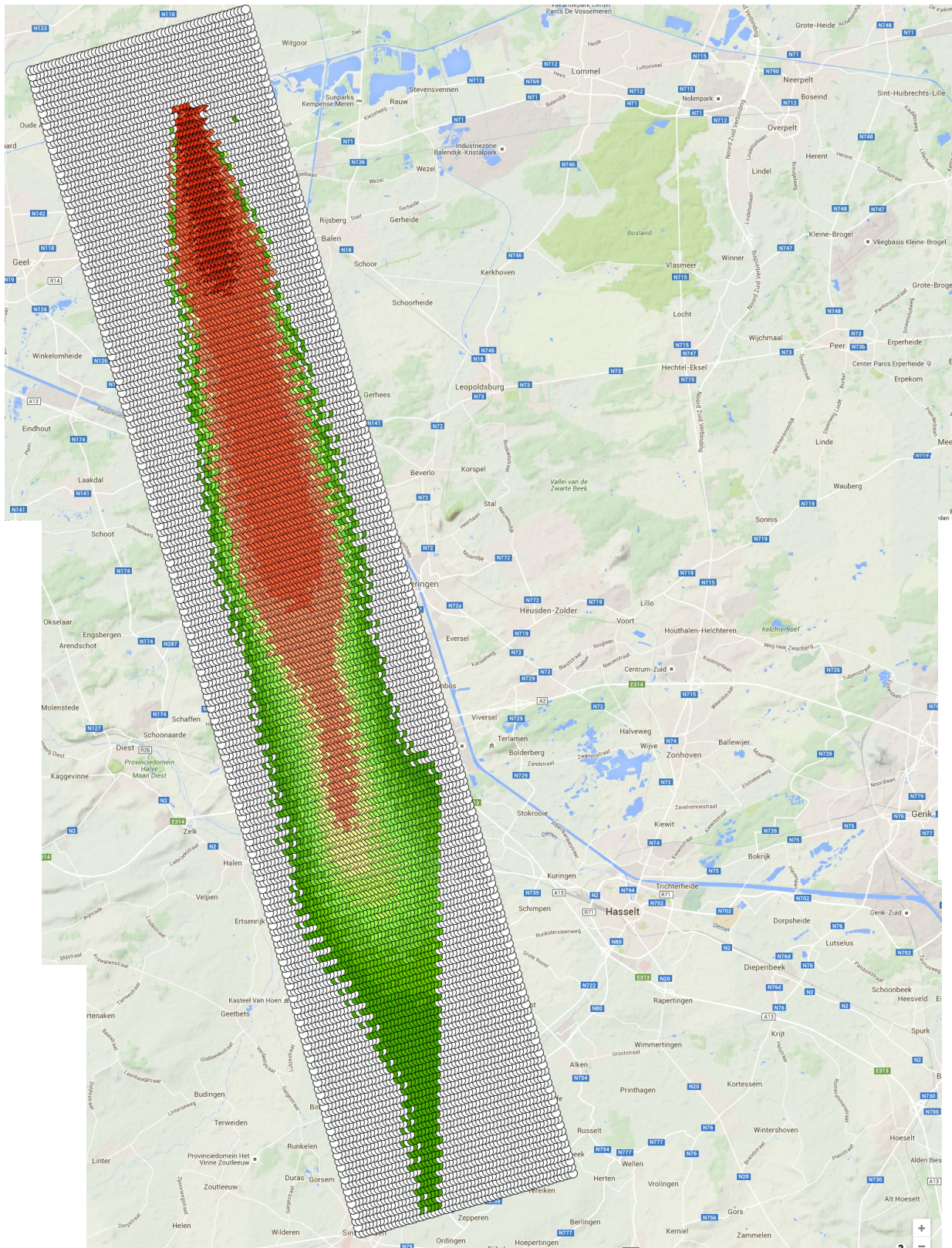
d. vergroting van gedetailleerde vlucht



e. verdere uitvergroting van gebied waarbinnen maatregelen nodig zijn

Figuur 21: Detaillering van EL1 zonder regen en veranderlijke wind voor I-131

Uit deze resultaten volgt dat zelfs in dit geval, als de zone waarvoor maatregelen nodig zijn bijna 100 km² bedraagt, de maatregelen voor de jodium-besmetting na afzienbare tijd vervallen. In dit concrete geval is het maximum van 1570 kBq/m² na 10 halfwaardetijden verminderd tot onder het interventieniveau. Dit betekent dat na maximaal 3 maanden de meest besmette gronden terug vrijgegeven kunnen worden. Voor Cesium besmettingen ligt dit echter veel moeilijker door de langere halfwaardetijd. In het deelgebied met de maximale besmetting van 87800 Bq/m² duurt het zonder maatregelen voor decontaminatie nog 4 halfwaardetijden vooraleer de waarden het interventieniveau niet meer overschrijden. Dit betekent dus dat deze gronden niet binnen een redelijke tijd terug vrijkomen voor normaal gebruik.



Figuur 22: Volledige gedetailleerde resultaten van scenario EL1 met regen en vaste windrichting voor I-131 depositie

Resultaten voor alle scenario's

De samenvattende resultaten voor alle scenario's staan in tabel 11 en in de uitneembare bijlage D. Bij een vergelijking van de waarden valt het op dat scenario's met een vaste windrichting vaak een beduidend groter aantal Telerad meetpunten hebben waar een overschrijding van de detectielimiet is

vastgesteld. In deze scenario's trekt de radioactieve wolk immers over de site van de nucleaire elektriciteitscentrale van Tihange. Deze is omgeven door een groot aantal Telerad detectoren die 'in groep' het overschrijden van de detectiewaarden registreren. Bij een variabele windrichting zal de wolk ten westen van deze site overtrekken en dus deze concentratie aan Telerad meetpunten missen.

Verder is het duidelijk dat de invloed van de neerslag zeer sterk is. Alle scenario's met neerslag hebben beduidend hogere meetresultaten in alle onderdelen dan de scenario's zonder neerslag. De scenario's zonder neerslag zijn dan ook eerst opgesomd.

Het criterium dat met uitsluiting van de invloed van de neerslag het meest invloed heeft, is de bronterm. De vier brontermen zijn in oplopende waarde van invloed gerangschikt:

1. IL4 of intern lek gedurende 4 uur
2. IL24 of intern lek gedurende 24 uur
3. EL1 of extern lek gedurende 1 uur
4. EL4 of extern lek gedurende 4 uur

Hieruit lijkt te volgen dat hoe langer het lek bestaat hoe groter het effect. Dit is inderdaad logisch omdat de duur van het lek ook mee bepaalt hoeveel isotopen vrijkomen. Belangrijker is of het lek beperkt blijft tot het reactorgebouw of niet. Indien het lek zich in het reactorgebouw voordoet zal de schade ook beperkt blijven. Dit gebouw is immers ontworpen om radioactiviteit te controleren en te bevatten. Bij een lek buiten dit gebouw zal de vrijgave naar de buitenwereld moeilijk te beperken zijn, wat dus leidt tot grotere effecten.

Tenslotte is er ook een klein effect van de variabiliteit van de wind. Dit komt in deze scenario's niet naar boven als van groot belang. Het is dan ook niet mogelijk hier een sluitend effect aan toe te kennen. Alleen is het wel zo dat bij een variabele windrichting over een groter gebied Telerad meetpunten de radioactieve wolk detecteren. Dit leidt niet tot een relevant groter oppervlakte voor de interventie maatregelen hoewel er toch een kleine tendens is dat bij variabele winden een groter oppervlakte onder de initiële maatregelen valt voor I-131. Voor Cs-137 is het niet mogelijk een tendens te onderscheiden. Mogelijks zou dit wel mogelijk geweest zijn indien er een wijziging in windrichting tijdens de periode van het lek zou optreden. Dit is enkel het geval in het scenario IL24 waar wel een significante verhoging van de oppervlakten met maatregelen voor Cs-137 ten opzichte van het scenario met vaste windrichting waar te nemen is. Om dit effect te bestuderen zou men scenario's met weersomstandigheden met sneller veranderende windrichtingen moeten uitwerken.

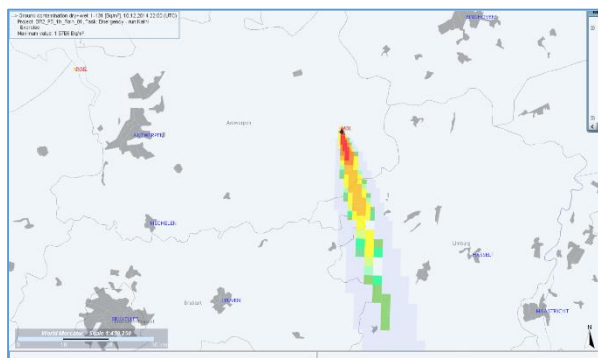
Tabel 11: Samenvattende resultaten van alle scenario's

Bronterm	IL4	IL4	IL24	IL24	EL1	EL1	EL4	EL4	IL4	IL4	IL24	IL24	EL1	EL1	EL4	EL4
Neerslaghoeveelheid (mm/h)	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10
Windgedrag	345°	0-270°	345°	0-270°	345°	0-270°	345°	0-270°	345°	0-270°	345°	0-270°	345°	0-270°	345°	0-270°
Telerad meetpunten	262	262	262	262	262	262	262	262	262	262	262	262	262	262	262	262
# boven detectie (dosistempo)	35	6	5	9	63	19	64	23	6	4	6	7	65	14	64	26
# boven detectie (I-131)	2	1	4	6	7	11	6	5	3	2	6	8	6	4	6	3
# boven detectie (Cs-137)	0	0	2	1	1	0	1	0	2	1	4	5	2	1	3	1
# boven interventie (dosistempo)	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	2	1	1	0
# boven interventie (I-131)	1	1	3	5	6	9	6	4	2	1	4	8	5	3	6	3
# boven interventie (Cs-137)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	1	1	1	1
Maximaal dosistempo (µSv/h)	0,45	0,60	0,73	0,34	966,61	866,31	197,42	191,11	1,41	0,85	1,51	1,33	321,23	309,87	229,63	162,42
Tijdstip van het maximum (h)	1	4	13	16	1	1	4	4	4	4	31	23	1	1	4	4
Tijdstip dat radioactieve wolk Belgisch grondgebied verlaat (h)	22	23	28	28	21	21	21	21	20	21	28	28	21	21	21	21
Tijdstip helikoptervlucht (h)	23	24	29	29	22	22	22	22	21	22	29	29	22	22	22	22
Verkennde vlucht																
Oppervlakte (km²)	2640	2184	1967	4164	6231	2775	1626	2568	1377	1851	994	1940	6000	2151	2860	2523
Lengte (km)	24,0	21,0	51,9	51,6	31,0	25,0	17,6	24,0	13,3	27,5	19,0	51,2	30,0	19,9	32,8	27,6
Breedte (km)	110,0	104,0	37,9	80,7	201,0	111,0	92,4	107,0	102,0	67,3	52,3	37,9	200,0	108,1	87,2	91,4
Afstand tussen lijnen (m)	1750	1500	1250	2580	4250	1875	1125	1750	1250	1250	1250	1250	4000	1375	1750	1500
Afstand tussen meetpunten (m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Benodigde tijd (h:min)	8:38	8:23	8:25	9:04	9:27	8:37	8:14	8:31	6:33	8:05	4:31	8:19	9:39	8:56	9:04	9:20
# meetpunten boven detectie	3	5	17	8	12	31	12	29	26	32	66	97	29	81	54	66
# meetpunten boven interventie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dosistempo detailvlucht																
Oppervlakte (km²)	14	18,9	160	52	153	158	120	156	95	75	431,8	44,17	288	228,39	252	192
Lengte (km)	2,0	3,0	10,1	4,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	4,0	12,7	7,0	8,0	6,9	8,0	6,0
Breedte (km)	7,0	6,3	15,9	13,0	25,5	26,4	20,0	26,0	19,0	18,8	34,0	6,3	36,0	33,1	31,5	32,0
Afstand tussen lijnen (m)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Afstand tussen meetpunten (m)	50	50	50	50	150	50	50	50	50	50	150	50	150	150	150	150

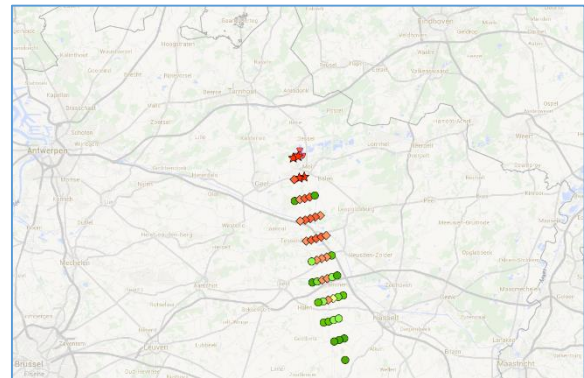
Benodigde tijd (h:min)	0:21	0:27	3:23	1:11	3:21	3:27	2:38	3:25	2:06	1:42	9:02	0:58	6:10	4:55	5:24	4:11
# meetpunten boven detectie	499	468	1952	1879	3874	4497	3306	4374	2819	3264	2105	127	3107	2935	2519	2753
# meetpunten boven interventie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I-131 detailvlucht																
Oppervlakte (km ²)	37,2	50	192	100	472	519	475	495	128	80	439	321	428	392	502	329
Lengte (km)	3	5	8,96	10	7,4	8,9	7,9	8,8	6	4	13	15,1	8,91	8,9	11,9	7,8
Breedte (km)	12,4	10	21,4	10	63,8	58,3	60,1	56,2	21,3	20	33,8	21,25	48	44,1	42,2	42,2
Afstand tussen lijnen (m)	250	250	250	250	250	250	400	300	250	250	250	250	250	250	400	250
Afstand tussen meetpunten (m)	50	50	50	50	150	200	50	150	50	50	150	150	150	150	150	150
Benodigde tijd (h:min)	0:52	1:07	4:04	2:09	10:07	11:00	6:34	8:50	2:47	1:49	9:11	6:42	9:05	8:19	6:44	7:01
# meetpunten boven detectie	1017	801	1241	1028	5008	4196	2889	4574	4018	4134	3581	3869	4983	4908	2838	4675
# meetpunten boven interventie	389	400	324	1028	844	804	503	807	1167	1233	1542	2011	2189	2437	1185	2162
Opp. interventie melk (km ²)	5	5	13	14	35	46	37	55	15	16	78	87	92	99	79	94
Opp. interventie groente (km ²)	2	2	7,5	7	16	16	18	16	10	11	39	31	54	58	49	57
Opp. interventie vlees (km ²)	0,1	0	2	2	6	7	8	6	2	2	9	16	11	12	15	18
Cs-137 detailvlucht																
Oppervlakte (km ²)		6	10						128	120	120	70	48	44	80	48
Lengte (km)		2,0	2						6,0	5,8	6,0	7,0	3,0	4,0	5,0	4,0
Breedte (km)		3,0	5						21,3	20,7	20,0	10,0	16,0	11,0	16,0	12,0
Afstand tussen lijnen (m)		250	250						250	250	250	250	250	250	250	250
Afstand tussen meetpunten (m)		50	50						50	50	50	50	50	50	50	50
Benodigde tijd (h:min)		0:09	0:15						2:47	2:36	2:38	1:32	1:08	1:01	1:47	1:06
# meetpunten boven detectie		11	316						761	961	3451	3742	1797	1643	1868	1643
# meetpunten boven interventie		0	8						197	232	1044	1506	828	853	775	848
Opp. interventie groente (km ²)			0,14						5	3	13	19	10,5	11	10	11
Opp. interventie melk+vlees (km ²)									0,35	0	10	13	8	8	7,5	8

Controle van resultaten van detailvluchten met JRODOS

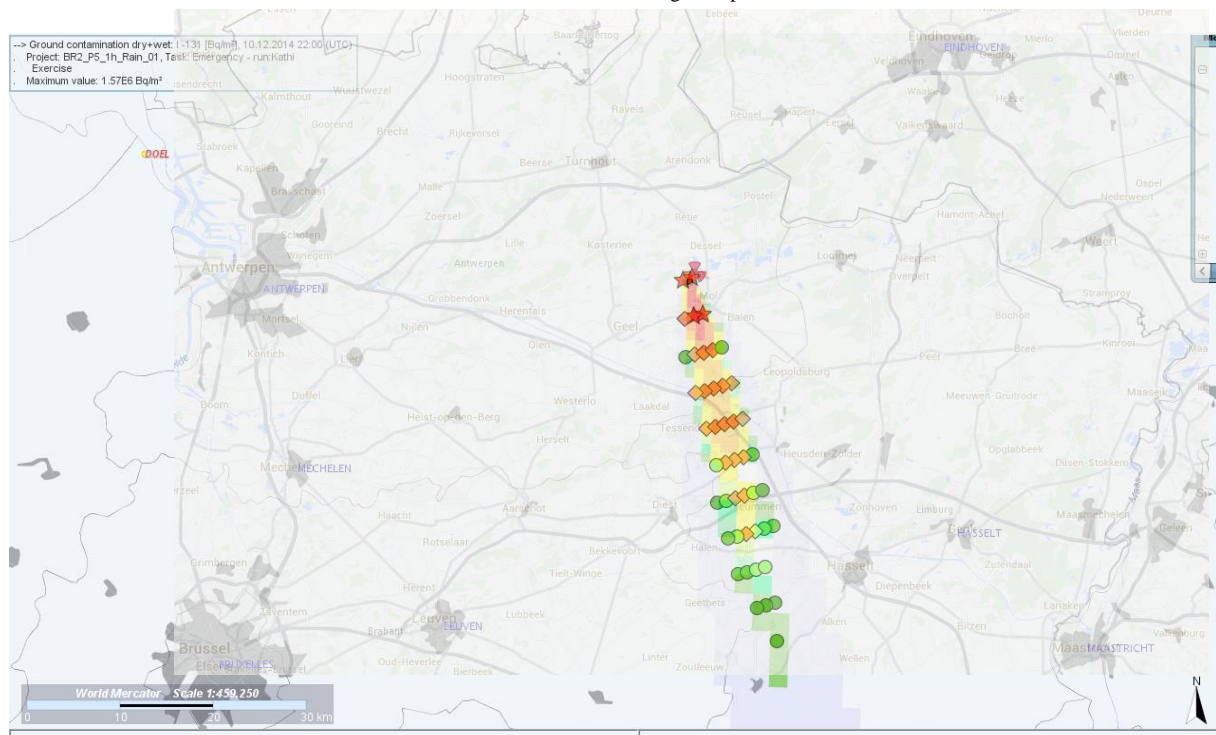
Een controle van de correctheid van de berekeningsmodule ten opzichte van de brongegevens gebeurt door in figuur 23 een beeld uit JRODOS met de depositiewaarden voor I-131 samen te voegen met de punten voor de helikoptervlucht voor dezelfde depositie. De oorspronkelijke figuren staan bovenaan naast elkaar waarna ze over elkaar geschoven zijn. De landsgrens tussen België en Nederland op elkaar leggen, zorgt voor een correcte positionering. Door het grillige verloop van deze grens kan een goede schaal- en plaats-overeenkomst bereikt worden. De legende van de JRODOS figuur is ook aangepast om overeen te komen met de waarden en kleuren gebruikt in de helikoptervlucht. In de samengevoegde figuur is duidelijk te zien dat de plaatsen en kleuren van beide figuren overeenstemmen. Dit sterkt het vertrouwen in de correcte werking van de berekeningsmodule.



JRODOS



Google Maps



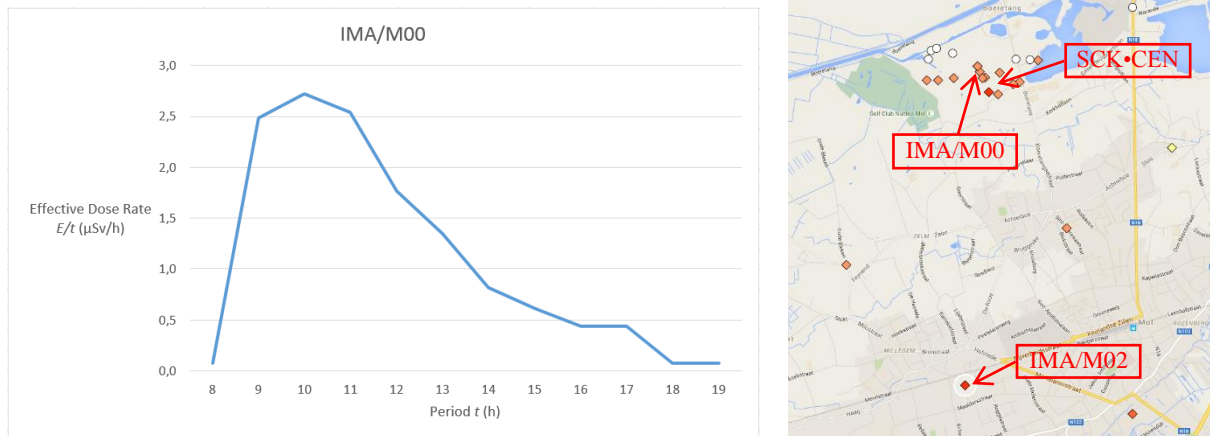
Samenvoeging van beide figuren met de landsgrens als referentie

Figuur 23: Samenvoeging van de depositiefiguur uit RODOS voor scenario EL1 met neerslag en vaste windrichting met de helikoptervlucht zonder de punten waarvoor de detectielimiet niet werd overschreden

Grafieken uit berekeningsmodule

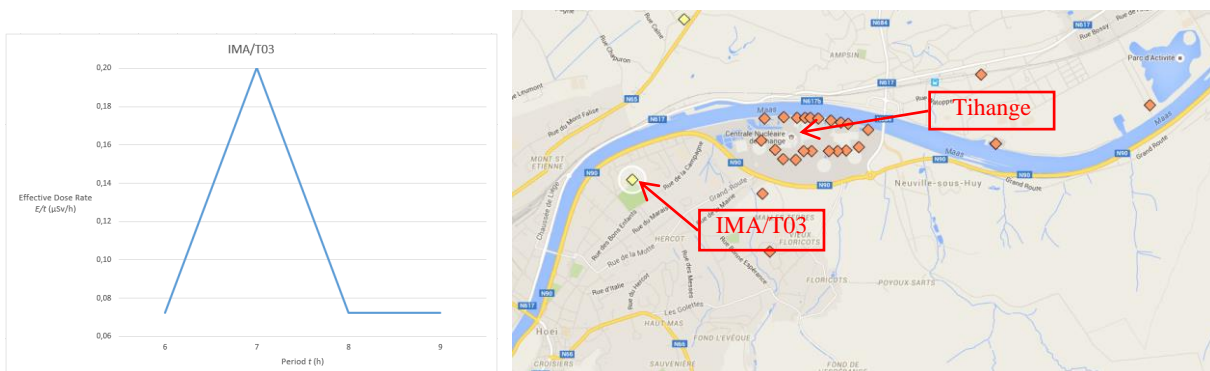
Zoals vermeld in hoofdstuk 3.2 zal de berekeningsmodule ook grafieken genereren wanneer al de gegevens worden omgezet. Deze grafieken laten toe het tijdsverloop van de meetwaarden te bekijken. De grafieken moeten echter juist geïnterpreteerd worden. Zo geeft figuur 24 de grafiek weer voor

Telerad meetpunt IMA/M00 in het scenario EL1 met neerslag en vaste windrichting. Dit station bevindt zich op het terrein van het SCK•CEN in Mol (Dessel) op minder dan 500 m ten westen van de BR-2 reactor. Omdat de wind steeds naar het zuiden gericht is, zal de radioactieve wolk pas 9 uur na het begin van het incident deze meetpost bereiken. Het dosistempo maakt op dat ogenblik een duidelijke sprong in de hoogte. Daarna neemt het geleidelijk af tot het 10 uur later terugvalt tot de achtergrondwaarden. Deze grafiek helpt te begrijpen dat de effecten hiervan geleidelijk verdwijnen maar dat er toch een belangrijk tijdelijk effect was.



Figuur 24: Grafiek van het dosistempo van Telerad punt IMA/M00 in scenario EL1 met neerslag en stabiele wind

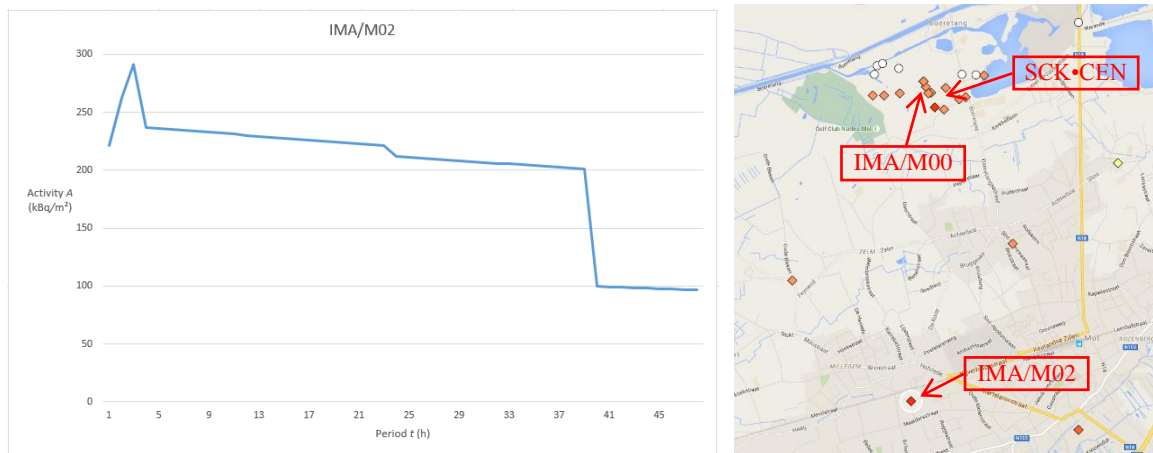
De figuur 25 voor de waarneming op Telerad meetpunt IMA/T03 in Huy aan het ‘Centre Sportif de Huy’ geeft een ander beeld waarbij het lijkt dat een grote toename van het dosistempo gebeurt op 7 uur na de start van het incident. Dit zal samenvallen met het overtrekken van de radioactieve wolk op deze plaats waardoor een maximum van 0,2 µSv/h bereikt wordt. Omdat de Y-as echter een veel kleiner bereik heeft, zal de werkelijke toename ongeveer 175 % boven de genomen achtergrondwaarde liggen. Voor deze plaats is een verhoging tot 0,135 µSv/h echter niet uitzonderlijk. De achtergrondwaarde ligt er van nature reeds rond de 0,1 µSv/h. De eigenlijke toename ten opzichte van de achtergrondstraling ligt dus eerder rond 140 %. Evengoed blijft de toename beperkt tot die tijdelijke piek tijdens het overtrekken van de wolk waarna de waarden terugvallen tot de achtergrond. Indien de grafiek zonder vergelijkend materiaal bekeken wordt, zou dit wel kunnen leiden tot een verkeerde interpretatie als een spectaculaire verhoging. Omdat het dosistempo enkel kortstondig tijdens het overtrekken van de radioactieve wolk verhoogt, is er geen noodzaak om maatregelen te treffen.



Figuur 25: Grafiek van het dosistempo van Telerad punt IMA/T03 in scenario EL1 met neerslag en stabiele wind

De volgende grafiek in figuur 26 toont de I-131 deposities voor Telerad meetpunt IMA/M02. Dit punt ligt buiten de terreinen van het SCK•CEN. Dit terrein is in Mol Ezaart waar de hondenschool de

Kempense Kwispel zich bevindt. Hier merken we een onmiddellijke verhoging waarna deze geleidelijk afneemt. Deze geleidelijke afname is een gevolg van het normale radioactief verval, maar de plotse halvering van de activiteit is onverwacht.



Figuur 26: Grafiek van de I-131 depositie van Telerad punt IMA/M02 in scenario EL1 met neerslag en stabiele wind

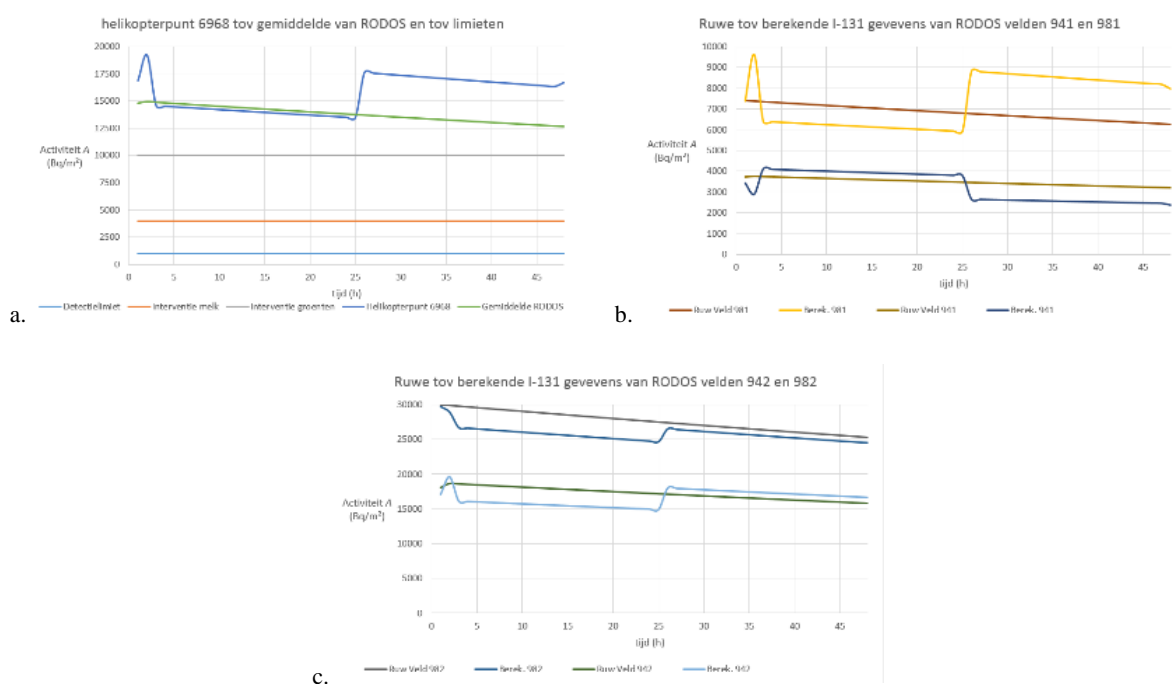
Dit verschil met de verwachting rond het (geleidelijk) afnemen van de meetwaarden is nog verder onderzocht. Hieruit blijkt dat dit samenhangt met de manier waarop Surfer de gegevens interpoleert. In de oorspronkelijke berekeningen is gebruik gemaakt van de (standaard) interpolatiemethode van Kriging. Er zijn dan ook tests opgezet met andere interpolatiemethoden zoals ‘Inverse Distance Weighing’ en ‘Nearest Neighbour’ maar deze leverden geen betere resultaten op. Het effect is voornamelijk te merken bij punten die op de rand van de detectielimiet liggen, maar ook voor punten die meer in het midden van het getroffen gebied liggen zijn er incorrecte variaties gevonden. Surfer laat toe om een regelmatig rooster van waarden op te stellen op basis van verspreid gelegen punten zoals JRODOS die aanlevert. Het houdt hierin echter geen rekening met het feit dat het onmogelijk is om negatieve waarden voor de radioactiviteit te bereiken. De berekeningsmodule zal deze waarden wel veranderen in nulwaarden maar de wijzigingen blijven zichtbaar in de grafieken. Om dit te vermijden zou de berekeningsmodule de stap langs het rooster van Surfer moeten overslaan. Bij tests om de code te wijzigen met een interpolatie op basis van de JRODOS gegevens zonder gebruik van het rooster van Surfer, bleek dat dit ‘gedrag’ inderdaad verdwijnt. Deze wijziging zou de berekeningsmodule wel ingrijpend veranderen. Het gedrag is pas naar boven gekomen toen de finale resultaten werden geïnterpreteerd en is dus niet meer aangepast. De tijd om de gevolgen van deze wijziging te testen en alle berekeningen over te doen ontbrak immers.

Het elimineren van de interpolatie door Surfer door een interpolatie in Excel op basis van de uitleg door GIS Geography [18] zou een grondige herziening van de code vergen op een aantal modules namelijk: ‘fillMaskForAll’, ‘fillMaskIfInRange’ en ‘fillMaskIfInRangeOfChopper’. Jammer genoeg ontbrak de tijd om deze code daarna nog grondig te testen en toe te passen op de gebruikte scenario’s. Een eerste poging daartoe maakte duidelijk dat dit waarschijnlijk een merkbare maar nog redelijke verhoging van de benodigde tijd zou meebrengen. Het zou wel de installatie van het Surfer-programma vermijden. Dit zou de verspreiding van de rekenmodule sterk vereenvoudigen. Er moet echter rekening gehouden worden met het gebruikte coördinatenstelsel. Immers een variatie in vlakcoördinaten komt veel meer overeen met de echte afstand dan deze gemeten in verschil in lengte- en breedtegraden. Men zou dus ook moeten overstappen van de gebruikte geografische coördinaten naar vlakcoördinaten. Het programma JRODOS kan de gegevens wel aanleveren in vlakcoördinaten want de berekeningsmodule heeft niet de mogelijkheid om vlakcoördinaten te berekenen vanaf lengte- en breedtegraad. Na toevoeging van een dergelijke module naar gelijkenis met de module

‘ConvertUTMtoLL’, is een overstap naar een interpolatie zoals ‘Inverse Distance Weighing’ binnen de berekeningsmodule wel doenbaar. De geografische coördinaten laten niet toe om een goede benadering van de werkelijke afstand tussen twee punten te vinden. Ook de bestanden met meetpunten gebruiken nu nog geografische coördinaten in plaats van vlakcoördinaten volgens ED50 in vlak UTM31.

cConvert kan deze gegevens in bulk omzetten, maar niet in hun huidige formaat. Als men deze omzetting zou voorbereiden en de resultaten opnieuw overbrengt naar de huidige meetpuntenbestanden, kan men deze nieuwe bestanden gebruiken. Dit is een eenmalige actie voor het bestand met Telerad meetpunten en het bestand met de mobiele meetpunten. Voor de helikopterpunten moet de conversie naar geografische coördinaten in de module uitgeschakeld worden. Deze conversie met de bestaande functie ‘ConvertUTMtoLL’ moet dan wel ingebouwd worden in het proces dat de gegevens converteert naar het formaat voor Google Maps.

Om de impact van het effect van de interpolatie bij grenswaarden te begrijpen, zijn in figuur 27 de gegevens voor de activiteit van I-131 zoals JRODOS die aanlevert, gelegd naast die uit de berekeningsmodule komen. Er is als eerste voorbeeld een helikopterpunt (nr 6968) gekozen dat ligt in het vlak gevormd door de middelpunten van de JRODOS velden 941, 942, 981 en 982. In de grafiek wordt het gemiddelde van de JRODOS-waarden en de berekende waarde van het helikopterpunt naast elkaar gelegd. Als referentie worden ook de detectielimiet en de interventiewaarden voor melk en groenten gegeven. Hier blijkt duidelijk het probleem dat gegevens na berekening plotse overgangen vertonen die niet in de brondata aanwezig zijn. Bij nader onderzoek van de resultaten voor de middelpunten van de verschillende velden bleek verder dat alle velden een dergelijke afwijking vertonen ten opzichte van de onbewerkte JRODOS-waarden. Dit blijkt duidelijk uit de grafieken b en c voor de gekozen JRODOS punten. Een mogelijke verklaring voor dit fenomeen is dat Surfer hier een soort grenswaarde-effect vertoont. Ook kan dit samenhangen met het gebruik van geografische coördinaten die eigenlijk niet in elke richting tot gelijkwaardige afstand omgerekend mogen worden. Het is echter ook duidelijk dat de algemene waarde toch nog redelijk de verwachte waarde volgt. De grafieken die eruit volgen geven echter deze moeilijk te verklaren schommelingen.



Figuur 27: Vergelijking ruwe RODOS-gegevens met de resultaten van de rekenmodule

Mits het gebruik van vlakcoördinaten in het hele proces, kan dit probleem verholpen worden. Er zou dan enkel bij het overgaan naar Google Maps omgerekend mogen worden naar geografische coördinaten.

7 Besluit

Zoals initieel vermeld, is het de bedoeling van deze masterthesis om tijdens een incident op een snellere manier te komen tot een aangepaste en efficiënte meetstrategie door het afbakenen van het getroffen gebied op basis van de beschikbare gegevens van de Telerad meetpunten. Met de aldus verkregen meetgegevens kunnen de nodige maatregelen uitgevoerd worden.

Bij elk belangrijk incident zal onder leiding van het FANC een federaal crisis centrum bemand worden met verschillende cellen waarvan een voorbeeld voor de cel metingen in figuur 1. De radiologische evaluatie cel zal hierbij steunen op de gegevens verzameld vanaf het Telerad-netwerk en deze aanvullen met gegevens verzameld door de mobiele meetteams onder andere deze van het SCK•CEN en het IRE.

Deze kunnen gebruik maken van mobiele teams en/of een helikopter uitgerust met verschillende mogelijke meetapparaten. Om deze teams efficiënt aan te sturen, is het nodig te weten in welk gebied de radionucliden zich verspreid kunnen hebben. Het programma JRODOS, ontwikkeld in antwoord op het incident in Chernobyl in 1986, kan op basis van de veronderstelde of gemeten bronterm en weersgegevens een simulatie van de mogelijke gevolgen doen. Een dergelijke simulatie met hypothetische brontermen en weersgegevens is dan ook gebruikt om voor deze masterthesis te dienen als meetgegevens en om achteraf het resultaat te vergelijken met deze gegevens. JRODOS kan deze gegevens ook grafisch voorstellen zoals in paragraaf 3.1 gebruikt is.

De rekenmodule die in het kader van deze masterthesis is uitgewerkt, zal de gegevens die JRODOS aanlevert voor oppervlaktes van 100 op 100 m tot verschillende vierkante kilometers, omrekenen tot verwachte waarden in specifieke geografische punten die overeenkomen met gekende of nieuwe meetpunten. Dit maakt het mogelijk om de waarden af te toetsen op de werkelijk gemeten waarden. Zo krijgt het JRODOS-model de nodige bewijskracht waarmee de resultaten ook naar het publiek gecommuniceerd kunnen worden.

De meetpunten die geen verhogingen meer vertonen bepalen de buitenranden van het gebied voor de verkennende meting. Zoals het testscenario aantoont, is het mogelijk dat een radioactieve pluim tussen twee meetstations beweegt zonder dat deze stations een verhoging vaststellen. Een systematische meting door middel van een helikoptervlucht zou de plaatsen met deposities beter detecteren en op die manier de eigenlijke grens van het gebied kunnen vaststellen. Doordat de helikopter niet beperkt is tot goed bereikbare gebieden, kan het deze informatie ook verkrijgen voor minder toegankelijke gebieden. Dit alles levert een betere dekking van het gebied op die toelaat om onverwachte bewegingen van de radioactieve wolk of lokale anomalieën toch op te merken.

De rekenmodule heeft ook een functie die toelaat het vliegpatroon voor een dergelijke vlucht uit te zetten. De ‘waypoints’ of meetpunten voor een dergelijke vlucht kunnen met een variabele afstand genomen worden en kunnen op hun beurt gekoppeld worden aan de verwachte waarnemingen die door JRODOS berekend zijn. Door hiervan gebruik te maken, is in een testscenario duidelijk geworden dat een groter gebied in rekening gebracht moest worden dan in eerste instantie op basis van enkel de waarnemingen van het Telerad-netwerk ingeschat was. De waarnemingen van het mobiele team maakten een drastische uitbreiding nodig.

De gegevens die de rekenmodule aanlevert, kunnen ook snel voorgesteld worden op een kaart door middel van de toepassing Google Maps. De module zet ze daarvoor om naar het kml-formaat van Google Maps. Indien gekend, worden de meetwaarden hier ook bij opgenomen.

De rekenmodule kan ook de verwachte gegevens voor het vliegpatroon op dezelfde manier gaan invullen. Deze berekening werd in de bespreking grafisch vergeleken met de grafische voorstelling uit JRODOS en de overeenkomst tussen beide bevestigt dat de berekeningen inderdaad een juiste voorstelling van de verspreiding geeft.

Op het vlak van communicatie naar de pers of het bredere publiek kan de berekeningsmodule een alternatieve manier betekenen om deze zo vlot en duidelijk mogelijk te laten gebeuren. Het kml-formaat maakt de informatie immers toegankelijker en meer visueel dan tabellen met coördinaten en getallen. Google Maps is een applicatie die vrij toegankelijk en algemeen aanvaard is, zonder dat de onafhankelijkheid ervan in vraag gesteld zal worden. Het gebruik van een dergelijk medium zal ook bijdragen tot de aanvaarding van de gegevens. Mensen kunnen beter inschatten wat de gevolgen van deze metingen voor henzelf betekenen als ze de resultaten ervan in hun eigen omgeving kunnen situeren. Dit zal de medewerking van de bevolking verbeteren zodat de totale kostprijs van de interventies zal verminderen.

Bij het vergelijken van de gebruikte scenario's is het duidelijk dat de neerslag de grootste invloed heeft op de uiteindelijk te nemen maatregelen. Neerslag zorgt voor het uitlogen van de radioactieve wolk en dus een verhoogde depositie. Deze depositie zal, naargelang van het isotoop voor een beperkte tijd, dan wel voor een lange periode maatregelen vergen. Jodium-131 deposities zullen na 3 maanden geen invloed meer hebben, terwijl een Cesium-137 depositie voor meerdere generaties gevolgen kan hebben.

De verschillen in bronterm en windgedrag geven geen onverwachte resultaten. Een grotere vrijzetting zorgt voor een groter besmet oppervlak en hogere meetwaarden. De wind bepaalt tevens duidelijk de richting van de verspreiding.

Hoewel de dekking van ons grondgebied door het Telerad netwerk bij de beste van Europa hoort, kan een bepaling van de uitbreiding van de contaminatie tijdens een incident niet enkel gebeuren op basis van de resultaten hiervan. De meteorologische gegevens spelen een duidelijke rol in de richting en resterende gevolgen van deze uitbreiding.

Nu is er een sterke concentratie van meetpunten rond de nucleaire installaties en daarbuiten is er een gelijkmatige verspreiding met een regelmatige opmeting aan de grens. De concentrische punten die het mobiele team gebruikt, geven een duidelijk beeld van de richting waarin de radioactiviteit zich verspreidt. Als deze punten snel genoeg opgemeten kunnen worden door het mobiele team vormen ze een goede aanvulling op het Telerad-netwerk.

De uitgewerkte methode is er in elk van de bekeken scenario's in geslaagd om op korte tijd na het overtrekken van de wolk een gebied af te bakenen waarover de verkennende vlucht moest plaatsvinden. Vervolgens bepaalt de methode ook steeds het meer beperkte gebied waarboven een gedetailleerde vlucht de nodige gegevens kan verzamelen. Deze gegevens laten op hun beurt toe om het interventiegebied te bepalen. Bij controle is deze bepaling steeds correct en er zijn geen delen gemist die wel een interventie nodig hebben. Hieruit volgt dat de meetstrategie succesvol is en dat de hulp van de rekenmodule hierbij erg nuttig is. Zoals reeds gezegd heeft men vooral nut van de functies achter de knoppen 'All Data to graphs', 'Calculate Helicopter', 'Export Column' en 'Convert Mask to KML'. Vanuit het stappenplan om tot een efficiënte meetstrategie te komen zal de eerste stap voor het bepalen van de punten die het gebied van de verkennende vlucht vooral baat hebben van de functie 'All Data to graphs' die de JRODOS gegevens volledig interpoleert naar de set van coördinaten van de Telerad meetpunten. Via Google Maps leidt een gebruiker dan de andere basisgegevens af, die na het invoeren in de rekenmodule via de 'Calculate Helicopter'-functie de helikopterroute berekent. Via de

‘Convert Mask to KML’-functie zal men deze nieuwe set van coördinaten omzetten naar een kml-bestandsformaat om te controleren of de afdekking klopt met de verwachting. In de simulaties in het kader van deze thesis wordt de verkennende helikoptervlucht vervangen door de functie ‘Export Column’ te lopen op deze set van coördinaten. Dan kan een gebruiker deze gegevens gebruiken om de gedetailleerde vluchtgegevens vast te leggen op dezelfde manier als hierboven al beschreven is.

Het is zeker nog mogelijk om een aantal verbeteringen of aanvullingen te doen op de huidige rekenmodule.

Zo zou het handig zijn om ook de omrekening van lengte- en breedtegraad naar ED50 UTM-coördinaten binnen de module op te nemen of om het ingeven van het startpunt in lengte- en breedtegraad mogelijk te maken. Dit zou de noodzaak van het gebruik van cConvert of externe websites vermijden.

Een andere verbetering zou zijn om de twee tussenstappen via Surfer in één stap te doen. Dit zou het aantal tussentijdse bestanden verminderen. Nog een mogelijke verbetering zou zijn om de tussentijdse bestanden opnieuw te gebruiken indien enkel het maskerbestand wordt gewisseld zoals regelmatig gedaan werd tijdens de pogingen om duidelijke resultaten te krijgen voor verschillende sets van meetpunten met een gelijke detectiewaarde.

Een nog beter alternatief zou zijn om de stap via Surfer over te slaan en de interpolatie rechtstreeks op de gegevens van JRODOS te doen. Dit zou het probleem van de negatieve waarden die door Surfer worden gebruikt om een vloeiend verloop te krijgen ook vermijden. Alle gegevens moeten dan gebruik maken van vlakcoördinaten tot bij het omzetten naar kml-bestanden.

Tenslotte zou een volgende versie het probleem, dat soms opduikt bij grote bestanden door een beperking op het geheugengebruik, kunnen voorkomen door de resultaatbestanden ook op te splitsen in bestanden van bijvoorbeeld 1000 punten tijdens de verwerking.

Als vervolgonderzoek lijkt het ook nuttig dat iemand die op deze thesis wil verder werken, kijkt naar een mogelijkheid om het verloop in de tijd voor de gekozen punten voor te stellen op de kaart. In Google Maps is het niet mogelijk om hier animaties rond te bouwen maar mogelijk levert Google Earth wel dergelijke mogelijkheden. De huidige methode van toevoeging van eigen gegevens aan de punten via kml-bestanden wordt door Google Earth als foutieve data aanzien.

Natuurlijk zou de module nog aangepast kunnen worden om andere vliegpatronen uit te stippelen zoals al aangehaald in dit werk. Hierbij zouden de gekozen patronen bijvoorbeeld de rand van het rechthoekig gebied kunnen bestrijken en/of de beide diagonalen overvliegen. Ook een patroon van concentrische cirkels is een mogelijkheid, al lijkt het dan wel verstandig om deze te beperken tot een bepaalde cirkelsector die vanaf de bron vertrekt. Op die manier zou de verspreiding op basis van de overheersende windrichting goed in kaart gebracht kunnen worden.

Literatuurlijst

- [1] J. Camps, „Monitoring and data management,” in *Preparedness for Nuclear and Radiological Emergency Response and Recovery*, Mol, 2016.
- [2] Karlsruhe Institute of Technology, „RODOS: Realtime Online DecisiOn Support system,” 5 10 2015. [Online]. Available: https://resy5.iiket.kit.edu/JRODOS/documents/JRodos_Report_forHomepage.pdf. [Geopend 25 11 2015].
- [3] J. Päsler-Sauer, „RODOS: Realtime Online DecisiOn Support system,” June 2004. [Online]. Available: <https://resy5.iiket.kit.edu/RODOS/Documents/Public/HandbookV6f/Volume3/ATSTEPfinal2.pdf>. [Geopend 02 05 2016].
- [4] C. Gueibe, *Installation manual for JRODOS*, Mol: SCK•CEN, 2013.
- [5] Golden Software, „Golden Software Technical Support,” Golden Software, 12 12 2015. [Online]. Available: <http://www.goldensoftware.com/forum/>. [Geopend 15 12 2015].
- [6] Nationaal Geografisch Instituut, „NGI - know-how - Geodetische diensten,” 10 10 2014. [Online]. Available: <http://www.ngi.be/NL/NL2-1-2.shtm>. [Geopend 03 02 2016].
- [7] Earth Point, „Convert coordinates,” Earth Point, 2016. [Online]. Available: <http://www.earthpoint.us/Convert.aspx>. [Geopend 22 5 2016].
- [8] LatLong.net, „Lat Long to UTM,” LatLong.net, 2012. [Online]. Available: <http://www.latlong.net/lat-long-utm.html>. [Geopend 22 5 2016].
- [9] International Atomic Energy Agency, „Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency,” IAEA, Vienna, Austria, 1999.
- [10] L. Winkelmann, H. Buchröder en M. Thomas, „Aerial measures with helicopters to determine accidental releases from nuclear facilities,” 06 11 2012. [Online]. Available: http://www.irpa.net/irpa9/cdrom/VOL.2/V2_237.PDF. [Geopend 18 08 2016].
- [11] Engineering Toolbox, „UTM to Latitude and Longitude Converter,” 2006. [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/utm-latitude-longitude-d_1370.html. [Geopend 25 Februari 2016].
- [12] D. Steven, „Lat/Lon and UTM Conversion - Yellowstone Research Coordination Network,” Montana State University, [Online]. Available: <http://www.rcn.montana.edu/resources/converter.aspx>. [Geopend 20 04 2016].

- [13] A. Sohier, "A European Manual for 'Off-site Emergency Planning and Response to Nuclear Accidents'," Belgian Nuclear Research Centre, Mol, Belgium, 2002.
- [14] J. Magill, G. Pfennig, R. Dreher en Z. Sóti, *Karlsruher Nuclidkarte*, Karlsruhe: Nucleonica GmbH, 2012.
- [15] J. Paridaens, *Weergegevens van meetmast op de site van het SCK•CEN*, Mol: SCK•CEN, 2014.
- [16] J. E. Martin, *Physics for Radiation Protection*, 3rd Edition, Hoboken: Wiley, 2013.
- [17] J. Camps, *Basic calibration principles for contamination survey by aerial monitoring*, Shijiazhuang, Hebei Province: SCK•CEN, 2016.
- [18] GISGeography.com, „Inverse Distance Weighted (IDW) Interpolation - GIS Geography," GISGeography.com, 5 June 2016. [Online]. Available: <http://gisgeography.com/inverse-distance-weighted-idw-interpolation/>. [Geopend 20 July 2016].

Bijlagen

A Installatiehandleiding JRODOS op Windows 64-bits

De handleiding zal in het Engels aangeleverd worden omdat dit de voertaal is in het SCK•CEN. Dit moet het mogelijk maken deze handleiding binnen het instituut (en eventueel daarbuiten) te hergebruiken. De structuur en inhoud van deze handleiding is gebaseerd op een bestaande handleiding die geldt voor 32-bits systemen [4].

Installation guide for JRODOS

Installation of PostgreSQL

The installer of PostgreSQL can be found at <http://www.enterprisedb.com/products/pgdownload.do>. After downloading launch the PostgreSQL executable. The installation wizard will pop-up on your screen.



The following steps will guide you through the installation:

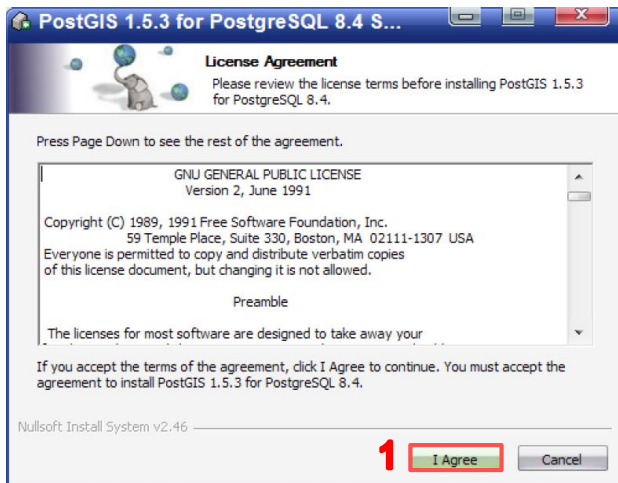
1. On the first screen click the next button
2. On the next screen you can select where you want to save the program and its generated data.
3. After doing this click the next button
4. The third screen asks you to provide a password for the superuser account (the name of this account is postgres) (write this password down because you'll need it during the installation of Postgis)
 - password needs to contain at least one Capital letter and one number

password	
----------	--

5. Select next
6. Leave the default port (for standalone mode) and select next
7. Select English, United States as locale
8. Let the check box as it is and select next
9. On the next window select next to install
10. In the window after the installation has been completed, please leave the check box blank
11. Select finish

Installation of PostGis

This installation can be found on <http://download.osgeo.org/postgis/windows/>. Launch the PostGis executable. The installer will pop-up.



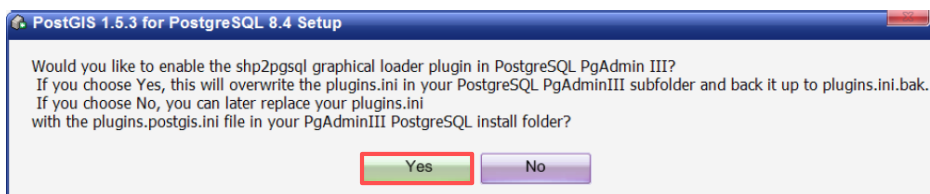
The following steps will guide you through the installation:

1. Accept the terms of the agreement by selecting I agree
2. Select the PostGis component to be installed
3. Select next
4. Select the installation folder (needs to be the same as for PostgreSQL). Leave the default one if it was also the default one during the PostgreSQL installation
5. Select next
6. Enter postgres as username, the password you choose during the PostgreSQL installation and the port (by default 5432).

port name	
-----------	--

7. Select next
8. Select a name for the Database (default is postgis)
9. Select install and wait until the end of the installation

If the following dialog box appears, select yes



10. Close the installation

JRodos

Now we can start the installation of JRODOS. In order to do this and the later customization three folders and 2 files are required.

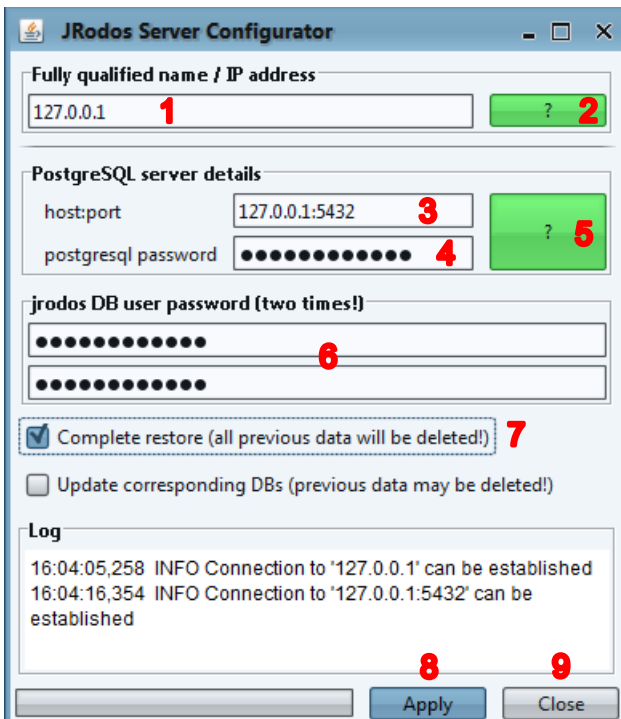
how I call them	how you call them
folders	
JRodosClientSeptember2013 (client)	
JRodosServerSeptember2013 (server)	
world-data	
files	
INVE.RESEARCH_DIMONA-	
reactors_EU_ISR	

In the standalone mode, both server and client will be installed on your pc. The world-data folder and the other files will be used for the customization of JRodos. Copy all the files and folders to your computer.

Configuration of JRODOS

Before we are able to run JRodos the server needs to be configured first. In order to do this, go into the JRodosClientSeptember2013 folder present on your computer and execute the file ConfigureJRodosServer.cmd.

The window below will pop-up on your screen.



1. Normally the IP-address should already be present if this is not the case enter the IP address of your computer.
2. Press the check button (?) to verify that the IP address is correct.
3. The host and the port should normally be present if not, enter your IP address followed by your port name.
4. Enter the password you had chosen for PostgreSQL
5. Press the check button (?) on the right of the textboxes you have just filled in.
6. Enter a password for the JRodos database (can be the same as the password of PostgreSQL)

password

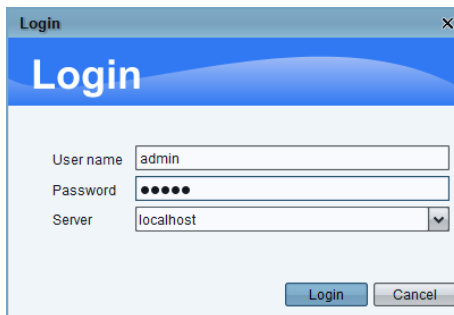
7. Check the complete restore box
8. Press apply and wait until everything is finished
9. Press close if the execution is successful
10. Else double check steps 1-4

Starting JRodos for the first time

In the server folder, execute JrodosServer.cmd. After double clicking a DOS command window will pop-up on your screen and execute automatically the commands. After the line server is running appears on the screen execute the JrodosClient.cmd standing in the JRodosClientSeptember2013 folder. This will also open a new DOS command window.

```
09:40:00.564 INFO Main:69 - Server is running
```

After a little time the window below will appear, where you should enter the following information.



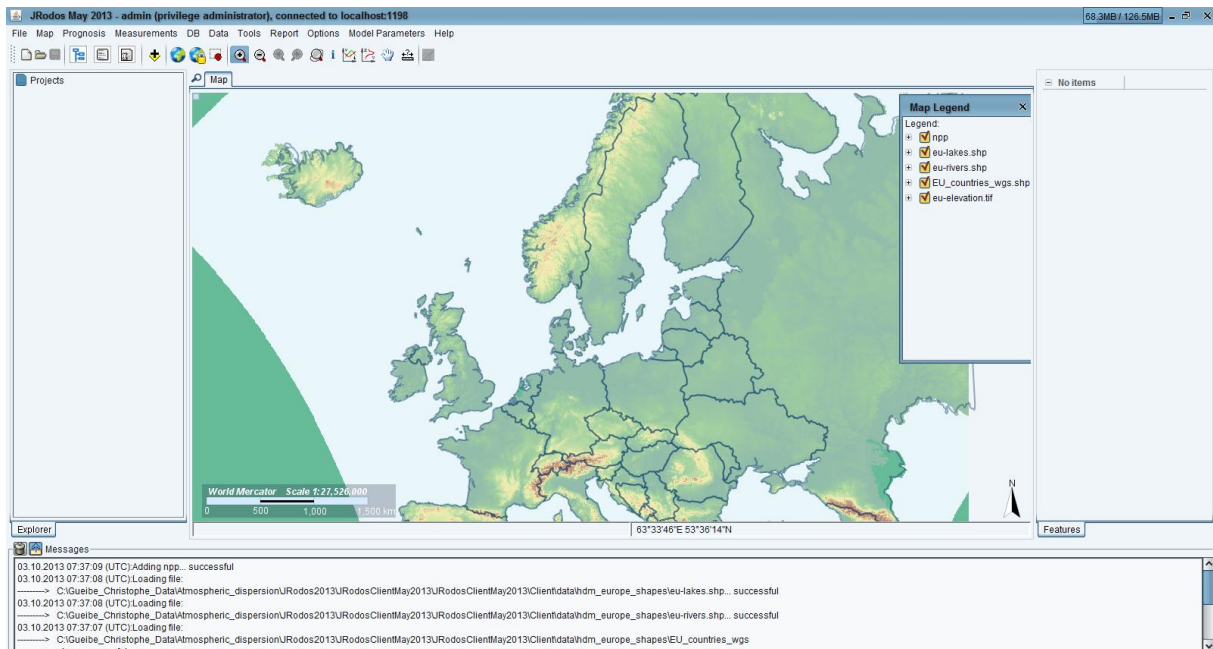
A login dialog box titled "Login" with a blue header. It contains three input fields: "User name" with the text "admin", "Password" with four black dots, and "Server" with a dropdown menu showing "localhost". At the bottom are "Login" and "Cancel" buttons.

User name: admin

Password: admin

Server: localhost

After entering this information press the login button.



When the window above appears JRodos is started. At this point only the European map and nuclear reactors are shown.

B Handleiding rekenmodule

De rekenmodule is een Excel spreadsheet met macro's en zal slechts werken op een Excel versie 2013 of hoger. Om deze volledig te gebruiken moeten de volgende programma's geïnstalleerd zijn op de computer:

- Microsoft Excel™ versie 2013 of hoger
- Surfer™

Het programma is aangepast om gegevens uit JRODOS te verwerken. Deze gegevens moeten als Excel-bestanden uit JRODOS geëxporteerd zijn, maar kunnen op een andere computer zijn aangemaakt. De JRODOS-installatie moet dus niet op deze computer staan.

De rekenmodule kan dan geopend worden in Excel. Om te werken moeten ook macro's toegelaten worden.

De rekenmodule kan verschillende taken aan. Indien de variabele gegevens niet gewijzigd zijn of indien deze verwijderd zijn door de knop 'Clear Values' te gebruiken zal het eerste werkblad er ongeveer zo uitzien:

	A	B	C	D
1	Data Kolommen	InputFile		Export, Grid & Dat Filename
2		ExportDirectory		
3		MaskFile		
4				
5		Select All Sources	Export Column	All Data to graphs
6				
7		Reset Output Folder	Calculate Helicopter	Convert Mask To KML
8				
9		Reset Mask File		
10				
11		Refresh Columns		
12				
13		Clear Values		
14			Source Data	
15		Name	BR2	
16		Description	Belgian Research Reactor 2	
17		Longitude	5,09941	
18		Latitude	51,22371	
19		Date Incident	10/12/2014	
20		Time Incident	0:00:00	
21				

Omdat de rekenmodule tot doel heeft gegevens om te zetten of te bewerken maar niet om gegevens op te slaan, heeft het een aantal andere gegevensbestanden nodig. Normaal worden deze gezet door op de knop 'Select All Sources' te klikken. De gebruiker krijgt dan de mogelijkheid om de volgende gegevens met behulp van helpschermen te selecteren:

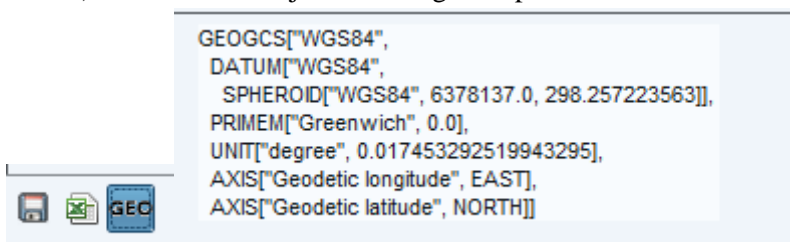
1. Het Excel-bestand dat JRODOS aanlevert met de berekende waarden voor de verschillende momenten en plaatsen.
2. De folder waarnaar de gegevens en tussentijdse bestanden zullen worden geschreven.
3. Het Excel-bestand met de punten waarvoor de waarden geïnterpoleerd moeten worden.

Voor elk van de beide Excel-bestanden wordt een specifiek formaat verwacht.

Het eerste bestand gebruikt het formaat dat JRODOS aanlevert in de huidige versie.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Ground effective gamma dose rate, nuclide specific: Cs-137 [mSv/h]::MolBR2::Emergency - run:Lilly								
2	Longitude	Latitude	Area	10.12.2014 01:00 (UTC)	10.12.2014 02:00 (UTC)	10.12.2014 03:00 (UTC)	10.12.2014 04:00 (UTC)	10.12.2014 05:00 (UTC)	10.12.2014 06:00 (UTC)
3	5,048086	51,19626	62500	0	0	0	0	0	0
4	5,0516315	51,196194	62500	0	0	0	0	0	0
5	5,055236	51,196133	62500	0	0	0	0	0	0
6	5,058782	51,19607	62500	0	0	0	0	0	0
7	5,062385	51,196007	62500	0	0	0	0	0	0
8	5,0659323	51,195946	62500	0	0	0	0	0	0
9	5,0695353	51,19588	62500	0	0	0	0	0	0
10	5,0730815	51,195812	62500	0	0	0	0	0	0
11	5,076685	51,195755	62500	0	0	0	0	0	0
12	5,0802317	51,19569	62500	0	0	0	0	0	0
13	5,0838346	51,19563	62500	0	0	0	0	0	0

Zoals hierboven getoond is de eerste lijn gevuld met de gegevens over de specifieke simulatie die gebruikt is om de gegevens te berekenen. Deze lijn wordt niet gebruikt in de rest van rekenmodule. De tweede lijn bevat de kolomnamen. De rekenmodule gaat ervan uit dat de eerste twee kolommen de locatie bepalen. Dit kan zowel in oosterlengte en noorderbreedte zijn als in vlakcoördinaten. Om de volledige functionaliteit van de rekenmodule te benutten is het nodig dat een bronbestand met lengte- en breedtegraad gebruikt wordt. Indien vlakcoördinaten gebruikt worden, zal het kml-bestand (zie verder) niet bruikbaar zijn voor Google Maps.



In JRODOS kan met de instelling 'Geo' gekozen worden voor geografische (ingeduwd) of vlakcoördinaten. De derde kolom bevat de oppervlakte waarop de gegevens betrekking hebben, maar wordt ook niet verder gebruikt in de rekenmodule. De vierde en volgende kolommen bevatten de berekende meetwaarden per periode. De kolomtitel op de tweede lijn geeft dit aan. Deze kolomtitels worden door de rekenmodule opgesomd om de gebruiker toe te laten een keuze te maken zoals verder aangegeven. De berekende meetwaarden worden weergegeven in mSv/h.

Het tweede Excel-bestand hoort in de eerste twee kolommen ook oosterlengte en noorderbreedte te bevatten en wel in dezelfde volgorde als het JRODOS-bestand. De rekenmodule is het meest grondig getest met lengte- en breedtegraad in deze volgorde hoewel dit theoretisch ook (in beide bestanden) kan omgewisseld worden of indien gewenst in beide bestanden vlakcoördinaten (in dezelfde volgorde) gebruikt kunnen worden.

	A	B	C	D	E	F
1	LONG E	LAT N	Id_nuc	Name	Value	
2	4,359123	50,845042	AER/B01	Brussel - FANC /AFCN		
3	2,651320	51,088040	AER/D01	Koksijde - militair Vliegveld		
4	3,716700	51,156200	AER/D02	Kluizen - water spaarbekken		
5	4,533530	50,446900	AER/F01	Fleurus - IRE		
6	4,594220	50,095720	AER/F02	Dourbes - Centre de Physique du Globe		
7	5,090330	51,216620	AER/M01	Mol - SCK		
8	6,075056	50,511110	AER/T01	Mont-Rigi - station scientifique des Hautes-Fagnes		
9	4,683540	50,091050	IMA/C01	Treignes - ULB Centre de l'Environnement P, Brien		
10	4,707970	50,117390	IMA/C02	Niverlee - réservoir d'eau		
11	4,736056	50,136250	IMA/C03	Doische - terrain de football		
12	4,833111	50,164444	IMA/C04	Haar - terrain communal		

Als derde kolom bevat het 'maskerbestand' een (liefst unieke en korte) identificatiecode van de soort radioactiviteit die gemeten wordt, zoals het nuclide, gasvormige radioactiviteit of aerosolen. De vierde kolom kan dan een naam of omschrijving van het meetpunt bevatten. Deze kolommen zullen volledig overgenomen worden naar het resultaatbestand. De vijfde en volgende kolommen kunnen in het resultaatbestand overschreven worden. Hierbij kunnen de reeds aanwezige waarden dus verloren gaan. Het verdient dus aanbeveling hierin geen waarden te hebben. Vooral de waarde 'Has Data' in de vijfde

kolom kan problemen geven bij sommige functies van de rekenmodule, maar ook andere kolommen worden best leeg gemaakt.

Het verdient aanbeveling om voor de folder waarin de resultaatbestanden en eventuele tussentijdse bestanden worden weggeschreven bij elke run een nieuwe of lege folder te kiezen. Indien bestanden moeten aangemaakt worden die al in de folder staan, geeft dit aanleiding tot een heleboel boodschappen in de stijl van ‘Het bestand XYZ bestaat al. Moet dit worden overschreven?’ die beantwoord moeten worden. Indien de gebruiker beslist niet te overschrijven leidt dit meestal tot het beëindigen van dit onderdeel van de verwerking en kan de rest van de verwerking aanleiding geven tot foutboodschappen.

De rekenmodule bevat een paar knopen die de gebruiker in staat stellen om de folder met de resultaatbestanden (de knop ‘Reset Output Folder’) of het bestand met de meetpunten (de knop ‘Reset Mask File’) opnieuw in te stellen, onafhankelijk van de functie om alle bronnen opnieuw in te stellen. Ook kan u de lijst met kolommen verversen door de knop ‘Refresh Columns’ te klikken. Dit doet u best wanneer u manueel het JRODOS-bestand ingevoerd heeft of indien het bestand intussen gewijzigd kan zijn. Ook indien de gebruiker per ongeluk de lijst met kolommen heeft gewijzigd, kan deze functie gebruikt worden.

De volgende functies zijn bruikbaar nadat de voorgenoemde gegevens zijn vastgelegd.

De functie achter ‘Export Column’ zal vragen wat de minimale waarde (boven de normale achtergrond) moet zijn om de gegevens mee te nemen en daarna nagaan welke cellen uit de lijst van ‘Data Columns’ geselecteerd zijn. Voor elk van deze kolommen zal het volgende gebeuren:

1. Zoek naar de juiste kolom in het JRODOS-bestand
2. Zoek in deze kolom naar de uiterste punten die een waarde hebben boven het ingestelde minimum. Deze uiterste punten uitgebreid met de grootte van het minimale verschil tussen twee punten bepalen een rechthoek. Enkel de punten binnen deze rechthoek worden in de verdere berekeningen meegenomen.
3. Neem alle punten binnen de bepaalde grenzen over naar een nieuwe spreadsheet samen met de waarde uit JRODOS uit de gekozen kolom.
4. Deze nieuwe spreadsheet wordt ingelezen in het programma Surfer en omgezet in een regelmatig rooster met de interpolatiemethode ‘Kriging’. Dit rooster wordt weer weggeschreven als een tekstbestand met spaties tussen de waarden (extensie ‘dat’).
5. Dit databestand wordt nu gebruikt om opnieuw de uiterste grenzen van het gebied te bepalen. Het bestand met de vaste of mobiele meetpunten wordt nu doorlopen en voor elke lijn wordt bekeken of de coördinaten binnen de gevonden grenzen liggen. Meetpunten buiten deze grenzen worden uit een kopie van dit bestand verwijderd. Voor elk meetpunt binnen het bereik wordt gezocht naar de vier roosterpunten die het dichtst bij dit meetpunt liggen. Daarvan berekent de rekenmodule een gewogen gemiddelde waarbij de opgegeven achtergrondstraling wordt opgeteld.
6. De punten die overblijven in dit eindbestand worden vervolgens samen met de gegevens over de bron zoals die staan in de kolommen onder ‘Source Data’ in een kml-bestand geschreven. Dit formaat laat toe om plaats gegevens in Google Maps op een kaart weer te geven en kan helpen om aan te geven tot hoever de besmetting gemeten kan worden.

Indien echter de optie ‘Helicopterpath’ aanstaat, zal stap 5 anders worden uitgevoerd:

5. Voor elk meetpunt in het gekopieerde bestand met meetpunten wordt gezocht naar de vier roosterpunten die het dichtst bij dit meetpunt liggen. Daarvan berekent de rekenmodule een

gewogen gemiddelde waarbij de opgegeven achtergrondstraling wordt opgeteld. Hier worden dus geen meetpunten uit dit bestand verwijderd.

De functie achter 'Calculate Helicopter' zal zich baseren op de gegevens in kolom N. Hieruit wordt de (wind)richting gebruikt om te weten over welke hoek de observaties ten opzichte van het noorden verdraaid moeten zijn. Het uitgezette pad zal heen en weer vliegen over een rechthoek met de opgelegde lengte en breedte en waarvan het middelpunt van de eerste zijde ligt op het referentiepunt. De afstand tussen elk punt en tussen elke heen en weer beweging kan ook ingesteld worden. Het aantal punten mag echter niet te hoog zijn. Excel kan immers niet meer dan 65535 rijen vullen vanuit een macro.

De functie 'All Data to Graphs' leunt eerder aan bij de 'Export Columns' functie. Ook deze functie begint met de vraag naar de minimale waarde om een relevante verhoging vast te stellen. Daarna wordt voor elke gevulde cel uit de lijst van 'Data Columns' het volgende uitgevoerd:

1. Zoek naar de overeenkomende kolom in het JRODOS-bestand
2. Zoek in deze kolom naar de uiterste punten die een waarde hebben boven het ingestelde minimum. Deze uiterste punten uitgebreid met de grootte van het minimale verschil tussen twee punten bepalen een rechthoek. Enkel de punten binnen deze rechthoek worden in de verdere berekeningen meegenomen.
3. Neem alle punten binnen de bepaalde grenzen over naar een nieuwe spreadsheet samen met de waarde uit JRODOS uit de gekozen kolom.
4. Deze nieuwe spreadsheet wordt ingelezen in het programma Surfer en omgezet in een regelmatig rooster met de interpolatiemethode 'Kriging'. Dit rooster wordt weer weggeschreven als een tekstbestand met spaties tussen de waarden (extensie 'dat').
5. Dit databestand wordt nu gebruikt om opnieuw de uiterste grenzen van het gebied en de afstand tussen de punten te bepalen. Het bestand met de vaste of mobiele meetpunten wordt nu doorlopen en voor elke lijn wordt bekeken of de coördinaten binnen de gevonden grenzen liggen. Meetpunten buiten deze grenzen worden niet gewijzigd. Voor elk meetpunt binnen het bereik wordt gezocht naar de vier roosterpunten die het dichtst bij dit meetpunt liggen. Daarvan berekent de rekenmodule een gewogen gemiddelde waarbij de opgegeven achtergrondstraling wordt opgeteld. Deze waarde wordt opgeslagen in een kolom overeenkomstig met de bronkolom. Dit meetpunt wordt ook gemarkeerd door een berekening van het maximum van de meetwaarden in de 5^{de} kolom te zetten. Dit zal tevens helpen om snel te kunnen zien of voor een meetpunt gegevens gevonden zijn.
6. Voor elk van de punten waarvoor verhoogde meetwaarden gevonden zijn, wordt een lijngrafiek aan het Excel-bestand toegevoegd met de punten waarvoor waarden gevonden zijn aangevuld met de basismetwaarde voor en na de meetpunten om de verhoging duidelijker aan te geven. Deze grafieken kunnen helpen bepalen of voor een punt een speciale behandeling nodig is.

De functie 'Convert Mask to KML' zal de meetpunten uit het bestand dat als 'Mask File' staat aangeduid allemaal omzetten naar een kml-bestand. De punten die gegevens bevatten worden als gekleurde punten gemarkeerd in functie van de waarde in de 5^{de} kolom. De andere punten als witte punten. Het resultaat kan weer gebruikt worden in Google Maps. Indien het bestand dat gemaakt wordt door de functie 'All Data to Graphs' hiervoor gebruikt moet worden dan met de knop 'Reset Mask File' eerst gebruikt worden om dat bestand aan te geven als 'Mask File'.

C Bespreking macro's rekenmodule

De rekenmodule bevat een aantal macro's die vanuit het voornaamste rekenblad aangeroepen kunnen worden met behulp van een aantal knoppen zoals hierboven vermeld en reeds besproken. Een aantal andere macro's echter dienen om deze grote basismacro's op een begrijpelijke manier onder te verdelen en eventuele wijzigingen of testen sneller te kunnen uitvoeren. Deze worden hieronder toegelicht.

Initialisatiemacro's

Deze macro's dienen om bepaalde waarden juist te zetten. Hierbij horen onder meer macro's om de juiste bestanden te openen of af te sluiten of de gebruiker te helpen bij het bepalen van de volgende stappen.

`setDataWorkbook`: zal een Excel-workbook openen zoals JRODOS deze oplevert om met deze data verdere berekeningen uit te voeren.

`setOutWorkbook`: zal een Excel-workbook openen om de resultaten van de berekeningen in weg te schrijven.

`CloseObjects`: zorgt dat bij het afsluiten ook andere bestanden die niet altijd zichtbaar weergegeven worden, correct worden afgesloten.

`selectInputFile`: zal de gebruiker via een popup-scherm een bestand vanuit JRODOS laten kiezen. Het volledige path van het bestand wordt geregistreerd en het bestand geopend. Ook worden de kolomnamen getoond.

`selectOutputFolder`: zal de gebruiker via een popup-scherm een folder laten kiezen waarin de resultaten kunnen weggeschreven worden. Dit resultaat wordt ook geregistreerd.

`selectMaskFile`: zal de gebruiker via een popup-scherm een bestand met meetpunten laten kiezen. Dit resultaat wordt ook geregistreerd.

`makeColumnList`: zal de kolomnamen uit het JRODOS-bestand tonen.

Hulpmacro's

Andere macro's zijn meer toegespitst op het gebruik dat we hier voorzien en ondersteunen dus de macro's in de voorgaande bijlage als deel van de code.

`TreatColumn`: exporteert de waarden boven een minimale waarde uit de aangegeven kolom uit het JRODOS bestand samen met de plaatsinformatie zodat dit kan verwerkt worden door Surfer. Deze gegevens worden in Excel-formaat bewaard.

`ConvertIntoFileName`: zal niet toegelaten of overbodige tekens uit de naam halen om deze te kunnen gebruiken als bestandsnaam.

`Convert2Grid`: neemt het bestand uit `TreatColumn` als input om een rooster van punten te maken dat de gegevens uit JRODOS interpoleert

`fillMaskIfInRange`: zal voor de opgegeven punten in het masker-bestand de geïnterpoleerde waarden toevoegen en lijnen weglaten die buiten het relevant gebied vallen.

fillMaskIfInRangeOfChopper: zal voor de opgegeven punten in het masker-bestand de geïnterpoleerde waarden toevoegen zonder lijnen die buiten het relevant gebied vallen weg te laten.

getWeightedMean: zal voor een punt op basis van de waarden van 4 omringende punten een gewogen waarde berekenen.

$$\begin{aligned}x_a &= \text{lengtegraad van punt } a \\y_c &= \text{breedtegraad van punt } c \\w_e &= \text{waarde van punt } e\end{aligned}$$

$$w_e = \frac{|(x_e - x_a) \times (y_e - y_a)| \times w_a + |(x_b - x_e) \times (y_b - y_e)| \times w_b + |(x_e - x_c) \times (y_c - y_e)| \times w_c + |(x_e - x_d) \times (y_e - y_d)| \times w_d}{(x_b - x_a) \times (y_b - y_a)}$$

CreateKML: zal de gegevens het finale gegevensbestand dat per kolom gemaakt wordt, omzetten tot een bestand in het kml-formaat dat aanvaard wordt door Google Maps. Er wordt rekening gehouden met de waarde om een verschillende kleur en vorm te geven aan het icoon dat gebruikt wordt.

startKMLFile: zal het kml-bestand aanmaken en het begin van de structuur reeds invullen. Ook kan de plaats van het incident worden aangegeven in het bestand.

closeKMLFile: zal het kml-bestand aanvullen met de gegevens rond de manier van voorstellen van de opgegeven plaatsen en correct afsluiten.

addRadiationMarker: voegt een plaats toe als de plaats van het incident aan het kml-bestand.

addRadiationStyle: voegt de informatie voor het voorstellen van de plaats van het incident toe aan het kml-bestand.

addNewMarker: voegt een nieuwe plaats toe met de stralingswaarde als gegeven aan het kml-bestand.

addNewStyle: voegt een nieuwe manier van voorstellen van punten toe aan het kml-bestand.

setStyles: voegt alle manieren van voorstellen van punten toe aan het kml-bestand.

findStyle: zoekt in de lijst met grenswaarden de juiste groep en geeft de overeenkomstige stijl terug.

FillColumn: zal de punten voor een helikoptervlucht bepalen en wegschrijven in een bestand.

MaakRechte: zal de punten voor één rechte vlucht voor de helikopter registreren

FillThisColumn: zal de waarden voor 1 periode uit het JRODOS-bestand omzetten in een formaat dat bruikbaar is voor Surfer

ConvertIntoDateTime: verandert de kolomhoofding in een leesbare datum en tijd

fillMaskForAll: zal voor de opgegeven punten in het masker-bestand de geïnterpoleerde waarden toevoegen

AddCharts: voegt voor rijen met waarden een grafiek toe. Deze functie kan voor grote bestanden resulteren in problemen door een beperking op het geheugen van de computer of het programma.

getMinimalDoseRate: vraagt de gebruiker om de minimale doserate op te geven waaronder berekende waarden verwaarloosd mogen worden.

setBackgroundToEmptyCells: zal voor het tekenen van grafieken lege cellen in de rij tussen gevonden waarden opvullen met de achtergrondstraling om de verwachte meetwaarde weer te geven.

ConvertUTMtoLL: zal van vlakcoördinaten omzetten naar lengte- en breedtegraden. Deze functie is gebaseerd op de functie zoals gevonden in de op de website van Engineering Toolbox [11].

Andere hulpfuncties in het bestand zijn nog aanwezig omdat dit bepaalde testen mogelijk maakte. Ze zijn niet verwijderd om toekomstige verbeteringen te vereenvoudigen.

Hoofdmacro's

Tenslotte zijn er de macro's die opgeroepen worden door de knoppen. Omdat de functienaam niet altijd overeenstemt met de tekst op de knop zijn ze hieronder nogmaals gegeven. Voor een bespreking kan u terecht in de voorgaande bijlage.

chooseColumn: de macro achter de knop 'Export Column'

calculate: de macro achter de knop 'Calculate Helicopter'

CleanSheet: de macro achter de knop 'Clear Values'

ConvertToKML: de macro achter de knop 'Convert Mask To KML'

PrepareGraph: de macro achter de knop 'All Data to graphs'

selectOutputFolder: de macro achter de knop 'Reset Output Folder'

selectMaskFile: de macro achter de knop 'Reset Mask File'

makeColumnList: de macro achter de knop 'Refresh Columns'

setColors: de macro achter de knop 'Show Result'

D Samenvattende resultaten van alle scenario's

Zie apart blad

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Het verbeteren van de meetstrategie tijdens nucleaire incidenten in reactie op de resultaten van vaste meetstations

Richting: **master in de industriële wetenschappen: nucleaire technologie-nucleaire technieken / medisch nucleaire technieken**

Jaar: **2016**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Mangelschots, Karel

Datum: **26/08/2016**