

# 4

Hoofdstuk 4

uit het veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie A-afval in Dessel

## *Karakteristieken van de site en haar omgeving*





## **Hoofdstuk 4**

### **Karakteristieken van de site en haar omgeving**

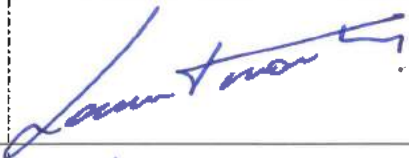


Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

Versies 1 en 2 van dit hoofdstuk werden geschreven door L. Wouters (NIRAS), nagekeken door W. Cool (NIRAS) en goedgekeurd door R. Bosselaers (NIRAS).

De huidige versie van dit hoofdstuk werd geschreven door L. Wouters (NIRAS).

Het werd nagekeken door W. Cool (NIRAS), E. Weetjens (SCK) en L. Sweeck (SCK).

Het werd goedgekeurd door R. Bosselaers (NIRAS) en B. Van Assche (NIRAS).

Goedkeuring document		
Goedkeuring	Datum	Handtekening
Geschreven door: LAURENT WOUTERS	30/01/2019	
Nagekeken door: EEF WEETJENS	30/01/2019	
Goedgekeurd door: RUDY BOSSELAERS BART VAN ASSCHE	31/01/2019 30/01/2019	

#### NIRAS

Kunstlaan 14  
1210 Brussel  
www.nirond.be

*De gegevens, resultaten, conclusies en aanbevelingen in dit rapport zijn eigendom van NIRAS. Dit rapport mag worden aangehaald mits de bron vermeld wordt. Het wordt beschikbaar gesteld op voorwaarde dat het niet gebruikt wordt voor commerciële doeleinden. Voor commercieel gebruik ervan, waaronder tevens het vervaardigen van kopieën of heruitgave, is de voorafgaande schriftelijke toestemming van NIRAS vereist.*

<b>Documentgegevens</b>			
Titel <b>Hoofdstuk 4</b> <b>Karakteristieken van de site en haar omgeving</b> <b>Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel</b>			
Geschreven door <b>Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen</b> <b>NIRAS</b> <b>Kunstlaan 14</b> <b>1210 Brussel</b>			
Serie	<b>Categorie A</b>	Documenttype	<b>NIROND-TR</b>
Status	<b>Open</b>	Publicatiedatum	<b>30 januari 2019</b>
Rapportnummer	<b>NIROND-TR 2011-04</b>	Revisienummer	<b>Versie 3</b>
Sleutelwoorden	<b>Bergingscolli, Categorie A, veiligheid, vergunningsaanvraag</b>		

<b>Revisietabel</b>																														
<b>Versie</b>		<b>Commentaren en overzicht van wijzigingen ten opzichte van vorige versie</b>																												
<b>Nr.</b>	<b>Datum</b>																													
1.0	30/11/2011	Initiële versie voor <i>Peer Review</i> en overmaakt aan FANC																												
2.0	30/09/2012	Versie ingediend bij het FANC samen met de vergunningsaanvraag tot oprichting en exploitatie (A1) van de oppervlaktebergingsinrichting voor categorie A-afval in Dessel																												
3.0	30/01/2019	<p>Herziene versie rekening houdend met de vragen van het FANC en Bel V op versie 2.0</p> <p><b>Vragen HS04</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><b>Vraag nr.</b></th> <th><b>Titel</b></th> <th><b>Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport</b></th> <th><b>Betrokken § in HS04</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>HS04-001</td> <td>Zelfdragendheid HS04</td> <td>HS04 werd quasi volledig herschreven.</td> <td>Volledig HS04</td> </tr> <tr> <td>HS04-002/1</td> <td>Ontbrekende elementen: windcategorieën en atmosferische dispersie</td> <td>Windcategorieën en atmosferische dispersie zijn opgenomen.</td> <td>4.4.2.2</td> </tr> <tr> <td>HS04-002/2</td> <td>Ontbrekende elementen: luchtkwaliteit</td> <td>Gegevens over de stofconcentratie werden verwerkt in de tekst. Het deel radioactiviteit in de lucht wordt opgenomen in HS16.</td> <td>4.8.4</td> </tr> <tr> <td>HS04-002/3</td> <td>Ontbrekende elementen: seismische responspectra</td> <td>De seismische responspectra voor de drie beschouwde terugkeerperiodes zijn opgenomen.</td> <td>4.5.4.4.2</td> </tr> <tr> <td>HS04-002/4</td> <td>Ontbrekende elementen: transportprocessen in de biosfeer</td> <td>De transportprocessen in de biosfeer worden besproken.</td> <td>4.11.2</td> </tr> <tr> <td>HS04-002/5</td> <td>Ontbrekende elementen: dispersie in de aquifer</td> <td>Dispersie en andere transportprocessen in de geosfeer</td> <td>4.11.1.1 (advectie), 4.11.1.2 (dispersie en</td> </tr> </tbody> </table>	<b>Vraag nr.</b>	<b>Titel</b>	<b>Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport</b>	<b>Betrokken § in HS04</b>	HS04-001	Zelfdragendheid HS04	HS04 werd quasi volledig herschreven.	Volledig HS04	HS04-002/1	Ontbrekende elementen: windcategorieën en atmosferische dispersie	Windcategorieën en atmosferische dispersie zijn opgenomen.	4.4.2.2	HS04-002/2	Ontbrekende elementen: luchtkwaliteit	Gegevens over de stofconcentratie werden verwerkt in de tekst. Het deel radioactiviteit in de lucht wordt opgenomen in HS16.	4.8.4	HS04-002/3	Ontbrekende elementen: seismische responspectra	De seismische responspectra voor de drie beschouwde terugkeerperiodes zijn opgenomen.	4.5.4.4.2	HS04-002/4	Ontbrekende elementen: transportprocessen in de biosfeer	De transportprocessen in de biosfeer worden besproken.	4.11.2	HS04-002/5	Ontbrekende elementen: dispersie in de aquifer	Dispersie en andere transportprocessen in de geosfeer	4.11.1.1 (advectie), 4.11.1.2 (dispersie en
<b>Vraag nr.</b>	<b>Titel</b>	<b>Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport</b>	<b>Betrokken § in HS04</b>																											
HS04-001	Zelfdragendheid HS04	HS04 werd quasi volledig herschreven.	Volledig HS04																											
HS04-002/1	Ontbrekende elementen: windcategorieën en atmosferische dispersie	Windcategorieën en atmosferische dispersie zijn opgenomen.	4.4.2.2																											
HS04-002/2	Ontbrekende elementen: luchtkwaliteit	Gegevens over de stofconcentratie werden verwerkt in de tekst. Het deel radioactiviteit in de lucht wordt opgenomen in HS16.	4.8.4																											
HS04-002/3	Ontbrekende elementen: seismische responspectra	De seismische responspectra voor de drie beschouwde terugkeerperiodes zijn opgenomen.	4.5.4.4.2																											
HS04-002/4	Ontbrekende elementen: transportprocessen in de biosfeer	De transportprocessen in de biosfeer worden besproken.	4.11.2																											
HS04-002/5	Ontbrekende elementen: dispersie in de aquifer	Dispersie en andere transportprocessen in de geosfeer	4.11.1.1 (advectie), 4.11.1.2 (dispersie en																											

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

			zijn opgenomen.	diffusie), 4.11.1.3 (sorptie), 4.11.1.4 (radioactief verval) & 4.11.1.5 (dilutie)
	HS04-002/6	Ontbrekende elementen: niet-radiologische en radiologische referentietoestand	Gegevens m.b.t. de niet- radiologische referentietoestand werden opgenomen.  Voor de radiologische referentietoestand wordt verwezen naar HS16.	4.12.1, 4.8.1.3 (chemische analyse van de vaste fase), 4.8.2 (vlocibare fase)  4.12.2
	HS04-003/1	Te detailleren elementen: topografie van de site	Figuur 4 - 12 toont de detailtopografie van een gebied van 30 km <sup>2</sup> rond de bergingsinrichting.	4.3.2.1.1
	HS04-003/2	Te detailleren elementen: erosiegevoeligheid	Een uitgebreide bespreking van de erosiegevoeligheid op de site en mogelijke toename van de erosiviteit bij klimaatsverandering is in de tekst opgenomen.	4.3.2.1.2
	HS04-003/3	Te detailleren elementen: voedingsgewoonten	De volledige tabel met de voedselinname voor volwassenen werd overgenomen	4.3.3.4.2
	HS04-003/4	Te detailleren elementen: aanpassing referentie toekomstig klimaat	Op basis van OD-077 V3 (§4.1, §4.2 & §4.3) werd een uitgebreide bespreking toegevoegd over de te verwachten klimaattevolutie en de onzekerheden hierop, met verwijzingen naar (inter)nationale publicaties.	4.4.3.1 (verwachte evolutive), 4.4.3.2 (onzekerheden) en 4.4.3.3 (de CCI-HYDR studies)
	HS04-003/5	Te detailleren elementen: lithostratigrafische beschrijving van de ondergrond op de site	Het deel handelend over de 'Geologie' werd aangevuld met een deel specifiek gewijd aan 'de geologie rond de site'. De beschrijving beslaat de gehele	4.5.3.1 (inleiding), 4.5.3.2 (stratigrafie en lithologie)

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

		diepte die relevant is voor de hydrogeologische modellen.	
HS04-003/6	Te detailleren elementen: verduidelijking hydrologisch bilan	De kwantificering van de termen van de waterbalans, en de onzekerheid hierop, worden uitvoerig behandeld.	4.6.2.1 (infiltratie, ET en run-off), 4.6.2.9 (Waterbalans)
HS04-003/7	Te detailleren elementen: verduidelijking betreffende infiltratiegegevens	De waarde van infiltratie en de onzekerheid hierop werden bepaald.	4.6.2.1
HS04-003/8	Te detailleren elementen: hydrostratigrafische eenheden	De HCOV-eenheden werden verduidelijkt. Bijkomend werd het conceptueel hydrogeologisch model verder gedetailleerd.	4.6.2.2, 4.6.2.3 en 4.6.2.4
HS04-003/9	Te detailleren elementen: hydraulische geleidbaarheid	Zie ook HS14-042. Een gedetailleerde bespreking van de hydraulische geleidbaarheid werd opgenomen.	4.6.2.6.2
HS04-003/10	Te detailleren elementen: piëzometrie en gradiënten	Zie ook HS14-002. Een gedetailleerde bespreking van de piëzometrische metingen en hun tijdsvariatie is opgenomen.	4.6.2.7
HS04-003/11	Te detailleren elementen: beïnvloedingsgebied contaminatie	De bepaling van het mogelijk beïnvloedingsgebied van de contaminatie werd opgenomen.	4.6.2.8
HS04-003/12	Te detailleren elementen: draagvermogen en variabiliteit van de metingen	De aspecten van draagkracht, zettingen en liquefactie worden in HS08 van het veiligheidsdossier behandeld. In HS04 worden de geotechnische aspecten van de site en de zettingsproef in detail besproken.	4.7



Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

	HS04-003/13	Te detailleren elementen: verdelingscoëfficiënt	Bijkomende toelichting bij de verdelingscoëfficiënt is opgenomen.	4.8.1.4
	HS04-003/14	Te detailleren elementen: geothermietoepassing en zijn gevolgen	De mogelijke gevolgen van oppervlakenabije open warmte-uitwisselingsinstallaties zijn toegevoegd.	4.9.2.1 (ondiepe geothermie)
	HS04-003/15	Te detailleren elementen: transportprocessen en geoen biosfeer	Voor het dispersieproces in de geosfeer verwijzen we naar HS04-002/5. Het dilutieproces wordt gedetailleerder beschreven.	4.11.1.5
	HS04-004	Onderschatte waarden van de bergingscoëfficiënt	Aan de hand van verklarende tekst en Tabel 4 - 57 wordt het verschil aangetoond tussen specifieke opslagcapaciteit en bergingscoëfficiënt.	4.6.2.6.5 (specifieke opslagcapaciteit) en 4.6.2.6.6 (specifieke bergingscoëfficiënt)
	HS04-005	hydrogeologische langtermijn tendensen	De inschatting van de impact van door mensen teweeggebrachte veranderingen aan de hydrogeologie zijn toegevoegd en de invloed van het al dan niet voortbestaan van het kanaal onder de verschillende klimaatscenario's is verder verduidelijkt.	4.6.2.7.4
	HS04-006	Insluitingseigenschappen van de site	De rol van de Kasterlee Klei is in de juiste context geplaatst.	4.6.2.2
	<b>Andere vragen van toepassing op HS04</b>			
	HS14-002	Bevestiging van de stroomsnelheid en -richting	De argumentatie voor de bevestiging van stroomsnelheid en -richting en de meetresultaten waarop deze argumentatie gestoeld is, zijn opgenomen in	4.6.2.7

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

		HS04.	
HS14-040	Veranderingen in de geosfeer	De delen van het antwoord die betrekking hebben op de fenomenologie zijn in het deel ‘Schatting van de impact van door mensen teweeggebrachte veranderingen aan de hydrogeologie’ opgenomen;	4.6.2.7.4
HS14-042	Onzekerheidsanalyse op de hydraulische geleidbaarheid	Zie ook HS04-003/9. Het antwoord is opgenomen in HS04.  Elementen van conceptueel hydrologisch model worden verduidelijkt.	4.6.2.6.2  4.6.2.3 en 4.6.2.4
<b>Andere aanpassingen</b>			
<b>Nodige aanpassingen aan veiligheidsrapport</b>			<b>Aangepaste § in HS04</b>
	De inplanting van de site is uitgebreider omschreven, een kadastraal uittreksel werd toegevoegd.		4.2
	Toevoeging van gegevens betreffende de bevolkingsdichtheid rond de site		4.3.1
	Significante uitbreiding van de tekst “Fysische Geografie” in vergelijking met versie 2		4.3.2
	Significante uitbreiding van de tekst “Menselijke Geografie” in vergelijking met versie 2		4.3.3
	Significante uitbreiding van de tekst “Huidig klimaat in België” in vergelijking met versie 2		4.4.1
	Significante uitbreiding van de tekst “Huidig klimaat in de Kempen” in vergelijking met versie 2		4.4.2
	Significante uitbreiding van de tekst “Klimaatevolutie” in vergelijking met		4.4.3

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

	<p>versie 2</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “De geologie rond de site” in vergelijking met versie 2 4.5.3</p> <p>Toevoeging van een beschrijving van de “Structurele geologie” van de omgeving van de bergingsite 4.5.3.3</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “Seismologie” in vergelijking met versie 2, op basis van OD-046 versie 3 4.5.4</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “Hydrologie” in vergelijking met versie 2 4.6.1</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “Hydrogeologie” in vergelijking met versie 2, met een uitgebreide bespreking van de hydrostratigrafie, hydraulische geleidbaarheid, grondwaterstanden, stromingsrichting, stroomsnelheid, waterbalans en het effect van door mensen teweeggebrachte veranderingen op de hydrogeologie 4.6.2</p> <p>Het deel betreffende de fenomenologie van de “Geotechnische karakteristieken ” van de site werd substantieel uitgebreid in vergelijking met versie 2. De aspecten rond de stabiliteit van de installaties (draagkracht en zettingen) zijn nu opgenomen in HS08. 4.7</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “Geochemische karakteristieken” in vergelijking met versie 2 4.8</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “Natuurlijke rijkdommen” in vergelijking met versie 2 4.9</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “Algemene beschrijving van de biosfeer” in vergelijking met versie 2 4.10</p> <p>Significante uitbreiding van de tekst “Transportprocessen in geosfeer en biosfeer” in vergelijking met versie 2 4.11</p>
--	---

## Inhoudsopgave

<b>4</b>	<b>Karakteristieken van de site en haar omgeving</b>	<b>4-1</b>
4.1	Inleiding en doelstellingen	4-1
4.2	Inplanting van de site en installaties	4-3
4.2.1	Situering van de bergingssite	4-3
4.2.2	Inplanting van de installaties op de bergingssite	4-6
4.3	Geografie, demografie en huidige en voorziene menselijke activiteiten	4-8
4.3.1	Gegevens betreffende de bevolkingsdichtheid rond de bergingssite	4-8
4.3.2	Fysische geografie	4-9
4.3.3	Menselijke geografie (demografie en menselijke activiteiten)	4-30
4.4	Meteorologie en klimatologie	4-55
4.4.1	Huidig klimaat in België	4-55
4.4.2	Huidig klimaat in de Kempen	4-57
4.4.3	Klimaatevolutie	4-62
4.5	Geologie en seismologie	4-67
4.5.1	Geologisch opbouw van het Kempens Bekken	4-67
4.5.2	De tektonische geschiedenis van de Kempen	4-72
4.5.3	De geologie rond de site	4-73
4.5.4	Seismologie	4-84
4.5.5	Conclusie	4-107
4.6	Hydrologie en hydrogeologie	4-108
4.6.1	Hydrologie (oppervlaktewater)	4-108
4.6.2	Hydrogeologie	4-122
4.6.3	Conclusies	4-207
4.7	Geotechnische karakteristieken	4-208
4.7.1	Context	4-208
4.7.2	Geotechnische aspecten	4-210
4.7.3	Bijkomende relevante parameters	4-216
4.7.4	Zettingsproef	4-217
4.7.5	Verificatie stabiliteit van de installaties	4-221
4.8	Geochemische karakteristieken	4-222
4.8.1	Vaste fase	4-222
4.8.2	Vloeibare fase	4-228

4.8.3	Achtergrondstraling en radioactiviteit in lucht, grondwater, oppervlaktewater, bodem en sedimenten	4-241
4.8.4	Stofconcentratie in de lucht	4-242
<b>4.9</b>	<b>Natuurlijke rijkdommen</b>	<b>4-243</b>
4.9.1	Fossiele brandstoffen	4-243
4.9.2	Geothermie als natuurlijke energiebron	4-245
4.9.3	Gasopslag	4-248
4.9.4	Delfstoffen	4-250
<b>4.10</b>	<b>Algemene beschrijving van de biosfeer</b>	<b>4-253</b>
4.10.1	Situering van het studiegebied	4-253
4.10.2	Natuurlijke systemen	4-255
4.10.3	Semi-natuurlijke systemen	4-255
4.10.4	Gebieden met een hoge biologische en ecologische waarde	4-262
<b>4.11</b>	<b>Transportprocessen in geosfeer en biosfeer</b>	<b>4-265</b>
4.11.1	Transportprocessen in de geosfeer	4-265
4.11.2	Transportprocessen in de biosfeer	4-266
<b>4.12</b>	<b>Referentietoestand van de site en haar omgeving</b>	<b>4-268</b>
4.12.1	Niet-radiologische referentietoestand	4-268
4.12.2	Radiologische referentietoestand	4-268
<b>4.13</b>	<b>Referenties</b>	<b>4-269</b>
4.13.1	Lijst van ondersteunende documenten (OD's)	4-269
4.13.2	Lijst van referenties	4-270
	<b>Bijlage 1-1: Lijst van gebruikte afkortingen</b>	<b>4-283</b>



## **4 Karakteristieken van de site en haar omgeving**

### **4.1 Inleiding en doelstellingen**

In Hoofdstuk 4 wordt de stand van zaken van de kennis betreffende de karakteristieken en processen (en hun ruimtelijke variabiliteit en onzekerheden) van de site en haar omgeving beschreven. Een eerste deel situeert de bergingssite in haar omgevingscontext (§4.2). Daarna wordt deze omgeving beschreven op het vlak van fysische en menselijke geografie (§4.3), op het vlak van meteorologie en klimatologie (§4.4), geologie en seismologie (§4.5) en hydrologie en hydrogeologie (§0). Ook de geotechnische aspecten (§0) evenals de geochemische karakteristieken (§0) van de ondergrond van de site worden behandeld in dit hoofdstuk. Verder komen nog aan bod de natuurlijke rijkdommen (§4.9), de biosfeer (§0) en de transportprocessen (§4.11). De referentietoestand van de site wordt volledig in een apart hoofdstuk (H16) van het veiligheidsrapport behandeld.

Hoewel de (langetermijn)veiligheid van een oppervlakteberging overwegend rust op de kunstmatige barrières, mogen de aspecten en kenmerken van de site en zijn omgeving niet onderschat worden, gezien een berging altijd is ingebed in een welbepaalde geografische en geologische omgeving. In een holistische visie, en elk bergingsproject bepaalt zulke werkwijze, dienen alle factoren in rekening gebracht en behandeld, hun relaties en wederzijdse beïnvloeding herkend, uitgetekend en beschouwd.

Een oppervlakteberging is bedoeld om als een passief systeem te functioneren over zeer lange tijdspannes. In elke fase in het bestaan van de berging dient de relatie met de omgeving begrepen en gekend te zijn. Deze zeer uitzonderlijke situatie vereist een gefundeerde kennis van het bergingssysteem gedurende de verschillende beschouwde tijdspannes. Dit zal toelaten om processen of voorvallen relevant voor de migratie van de radionucliden te identificeren en karakteriseren (Hoofdstukken 13 en 14 van het veiligheidsrapport). Het (langetermijn)gedrag van de berging dient begrepen te zijn, evenals de mogelijke evoluties van de omgeving die de performantie en veiligheid ervan zouden kunnen beïnvloeden. Bijkomend moeten alle noodzakelijke elementen verzameld worden om een robuuste installatie te kunnen ontwerpen en om de gekozen ontwerpvereisten en conformiteitscriteria te kunnen verantwoorden (Hoofdstukken 7 en 8 van het veiligheidsrapport). Eveneens zal op basis van de kenmerken van de site en zijn omgeving een monitoringprogramma worden ontwikkeld en zullen de referentie-achtergrondwaarden worden bepaald (Hoofdstuk 16 van het veiligheidsrapport).

In en rond de site werden in het kader van de oppervlakteberging drie grootschalige verkenningcampagnes georganiseerd met een groot aantal terreinproeven. Deze verkenningcampagnes hebben geleid tot een goede kennis van de site en van de ondiepe ondergrond. In dit rapport worden al de elementen samengebracht die de site en zijn omgeving op een kwalitatieve, maar ook op kwantitatieve wijze beschrijven. De schaal waarop de verschillende kenmerken worden uitgediept, site-specifiek, lokaal of regionaal, is afhankelijk van de aard en het detail van de informatie die nodig is. Sommige aspecten dienen zeer lokaal te worden beschouwd en behandeld, omdat de informatie in een ruimer kader weinig zinvol is. Dit is bijvoorbeeld het geval voor de geotechnische karakterisatie die beperkt blijft tot de bergingssite. De landschapsevolutie van de site moet dan weer in een ruimer kader worden bekeken, omdat de processen die hierop een invloed hebben zich op regionale (geologisch bekken) schaal afspelen.

De tekst steunt enerzijds op publicaties en documenten van de wetenschappelijke gemeenschap, anderzijds op technische rapporten, die specifiek werden opgesteld in het kader van het cAt-project of deel uitmaken van het onderzoeksprogramma rond het langetermijnbeheer van radioactief afval. Zo wordt er bij de behandeling van bepaalde thema's, onder andere de aspecten fysische geografie of klimatologische evolutie, gezocht naar mogelijke synergie tussen het categorie A (cAt) en het categorie B & C programma (SFC 1).

Voor bepaalde thema's die in dit hoofdstuk aan bod komen, wordt een verdere opvolging voorzien. Het is evident dat een aantal aspecten en karakteristieken van de site in de toekomst blijvend zullen worden opgevolgd, waarbij, voor bepaalde aspecten een duidelijke link bestaat met het monitoringsprogramma (Hoofdstuk 16 van het veiligheidsdossier). Dit is ondermeer het geval voor de opvolging van de waterpeilen van de verschillende aquifers in de omgeving en de verdere karakterisering teneinde een robuuste referentietoestand te bekomen. In een ander kader zullen de seismometers, die nu geïntegreerd zijn in het netwerk van KSB-ORB, verder door hun dienst Seismologie opgevolgd en beheerd worden.

De ondersteunende documenten aan dit hoofdstuk zijn:

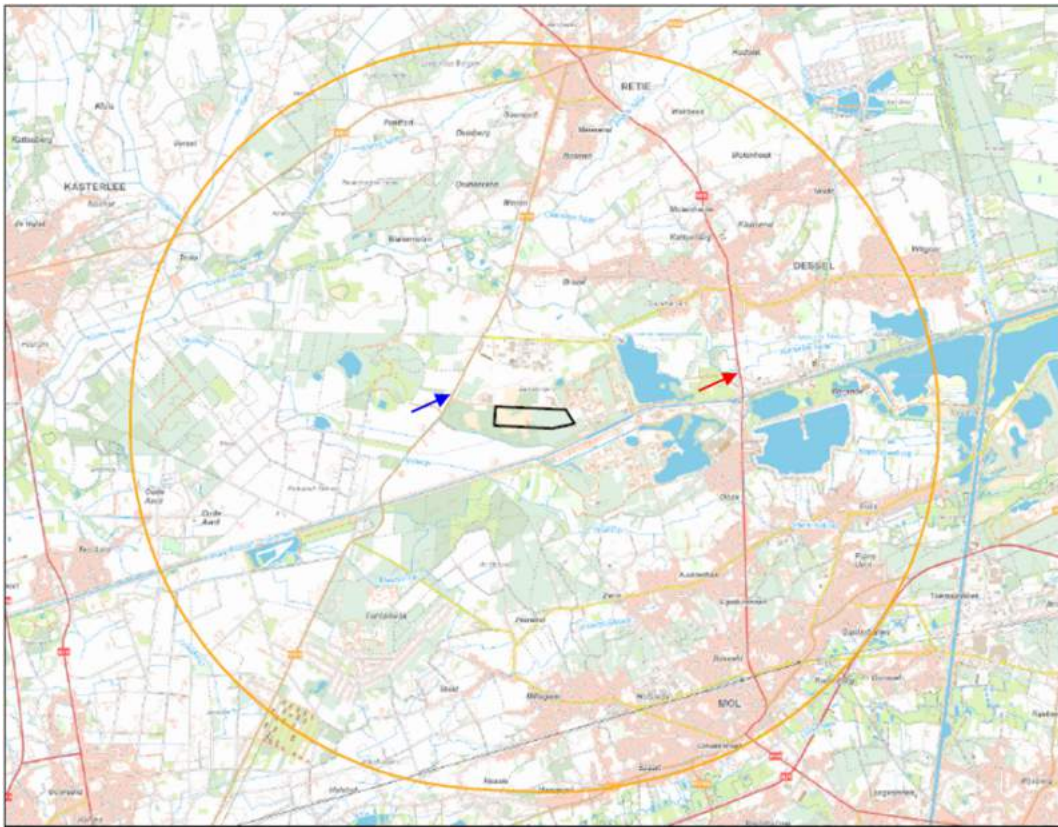
OD nummer	Titel	Doelstelling
026	Hydrogeological modelling of the Dessel site	Beschrijving van het grondwatermodel met een gedetailleerde beschrijving van de radiologische impactberekeningen voor de geosfeercomponenten.
040	Modelling potential and actual evapotranspiration and drainage at the nuclear	Overzicht van de belangrijkste onzekerheden betreffende de bodemwaterbalans
046	Seismic loading analysis	PSHA studie en bepaling van de design spectra
051	Geological, hydrogeological and hydrological data for the Dessel disposal site	Beschrijving van de (hydro)geologische aspecten van de omgeving rond de toekomstige bergingsite
077	Long-term climate change and effect on disposal facility, geosphere and biosphere	Informatie betreffende klimaatsveranderingen en de aanpak ervan
084	Inschatting van het overstromingsrisico ter hoogte van de noordelijke nucleaire site te Dessel-Mol	Inschatting van het overstromingsrisico ter hoogte van de bergingsite rekening houdende met een ophoging van de bergingsite tot 27 mTAW
086	Geotechnical report of the disposal site at Dessel	Overzicht van de geotechnische aspecten van de bergingsite
233	Climatic design loads	Definitie van de meteorologische belastingen die in rekening dienen te worden genomen in het ontwerp



## 4.2 Inplanting van de site en installaties

### 4.2.1 Situering van de bergingssite

De bergingssite voor categorie A-afval ligt in de zuidwestelijke hoek van het grondgebied van Dessel, net ten noorden van de grens met Mol, op een plaats die als ‘Zandbergen’ wordt aangeduid (Figuur 4 - 1 en Figuur 4 - 2). De gemeenten gelegen in een straal van 5 km rondom de bergingssite omvatten Dessel, Mol, Retie, Geel en Kasterlee. De N118, gelegen tussen Geel en het oprittencomplex van de autoweg E34 in Retie, zal mogelijk een belangrijke ontsluitingsweg voor de bergingssite vormen (Figuur 4 - 1). Deze weg geeft verder aansluiting op de E313 en de E34. Een tweede belangrijke weg is de N18 Retie-Mol ten oosten ervan (zie ook §4.3.3.2.1).



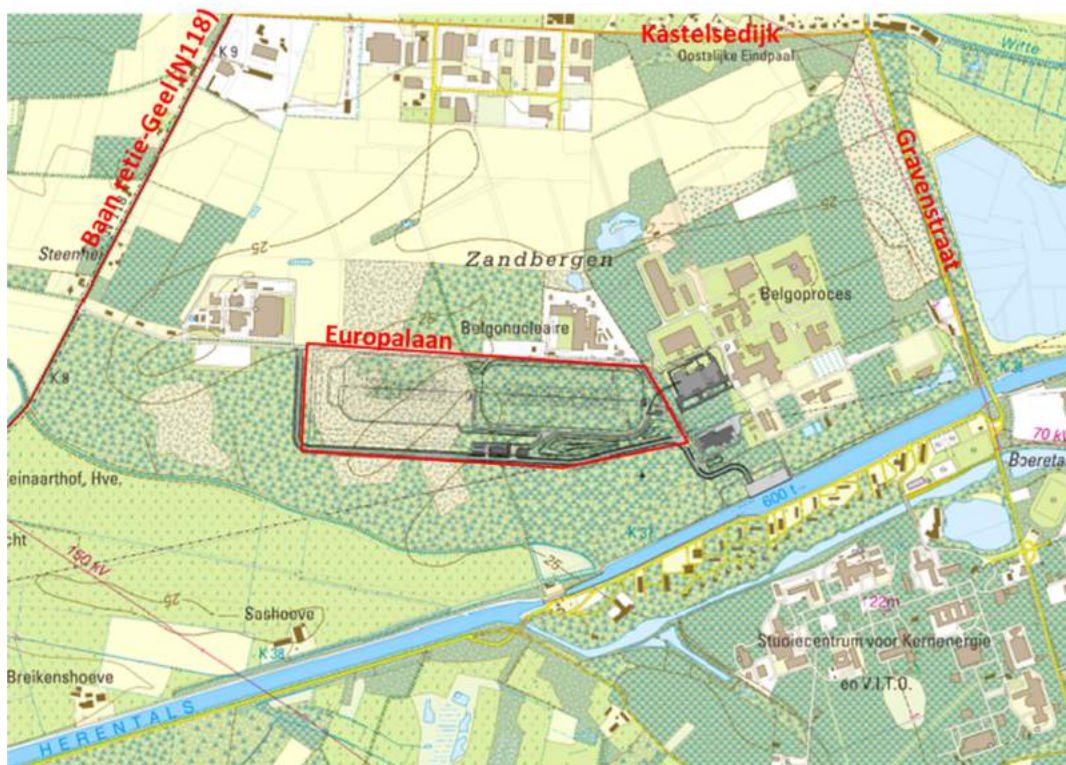
**Figuur 4 - 1: Situering van de bergingssite ten opzichte van de omliggende gemeenten en aanduiding van het gebied dat binnen een straal van 5 km valt rondom de bergingssite (kaart 3a & 3b, (ARCADIS) van de vergunningsaanvraag). Ligging N118 aangeduid met blauwe pijl, N18 met rode pijl.**

Het cAt-project met zijn verschillende onderdelen situeert zich in het gebied begrensd door het kanaal Bocholt-Herentals in het zuiden, de baan Geel-Retie in het westen, de Kastelsedijk in het Noorden en de Gravenstraat in het oosten (Figuur 4 - 2). De realisatie van het cAt-project omvat de inplanting van

verschillende projectonderdelen, allen ten noorden van het kanaal Bocholt-Herentals gesitueerd (Figuur 4 - 3):

- een kade voor de aanvoer van materialen;
- een caissonfabriek waarin caissons (betonnen kisten) worden aangemaakt;
- een installatie voor productie van monolieten, kortweg IPM genoemd;
- de bergingsmodules;
- proefopstellingen: demonstratieproef, proefafdekking, zettingsproef;
- randfaciliteiten: wegenis, nutsvoorzieningen, administratief gebouw, infiltratiebekken...;
- het communicatiecentrum
- de omzetting van bepaalde delen naar kmo-zone:
  - ▶ een uitbreiding van de kmo-zone Stenehei met circa 10 hectare in oostelijke richting;
  - ▶ een eventuele bijkomende uitbreiding in een latere fase in functie van veranderende behoeften.

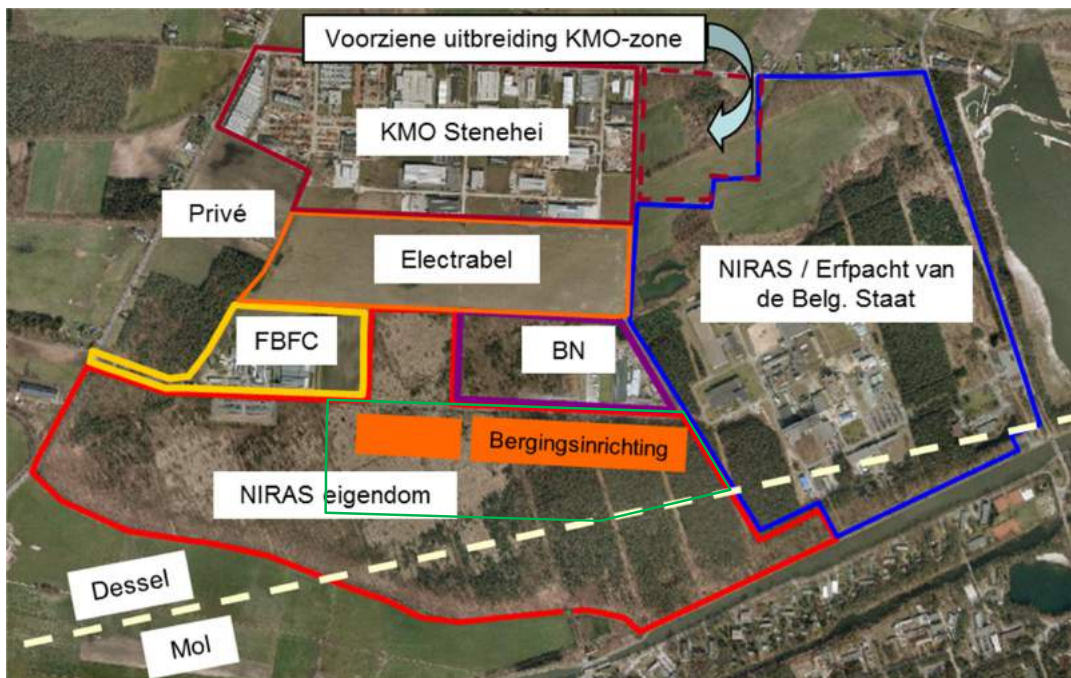
Grondeigenaars in dit gebied zijn en waren o.a. de Belgische staat, Umicore (ex-Union Minière), FBFC International, Belgonucleaire, Electrabel, NIRAS en diverse particulieren in een kmo-zone (noordwest) en in een landbouwzone (zuidwest; Figuur 4 - 4).



Figuur 4 - 2: Inplanting van de oostelijke en westelijke tumulus en de afbakening van de bergingsite (rode vijfhoek) op topografische kaart 1:10 000.



Figuur 4 - 3: Inplanting van de bergingssite (oranje vijfhoek) en van verschillende projectonderdelen. (1): kade; (2): caissonfabriek; (3): installatie voor de productie van monolieten (IPM); (4): bergingsmodules; (5): communicatiecentrum en proefopstellingen; (6): oostelijke uitbreiding van de kmo-zone; (7): zuidelijke uitbreidingszone; rode lijn: nieuwe verbindingsweg van de kade naar de site (deel met de stippellijn is de huidige situatie).



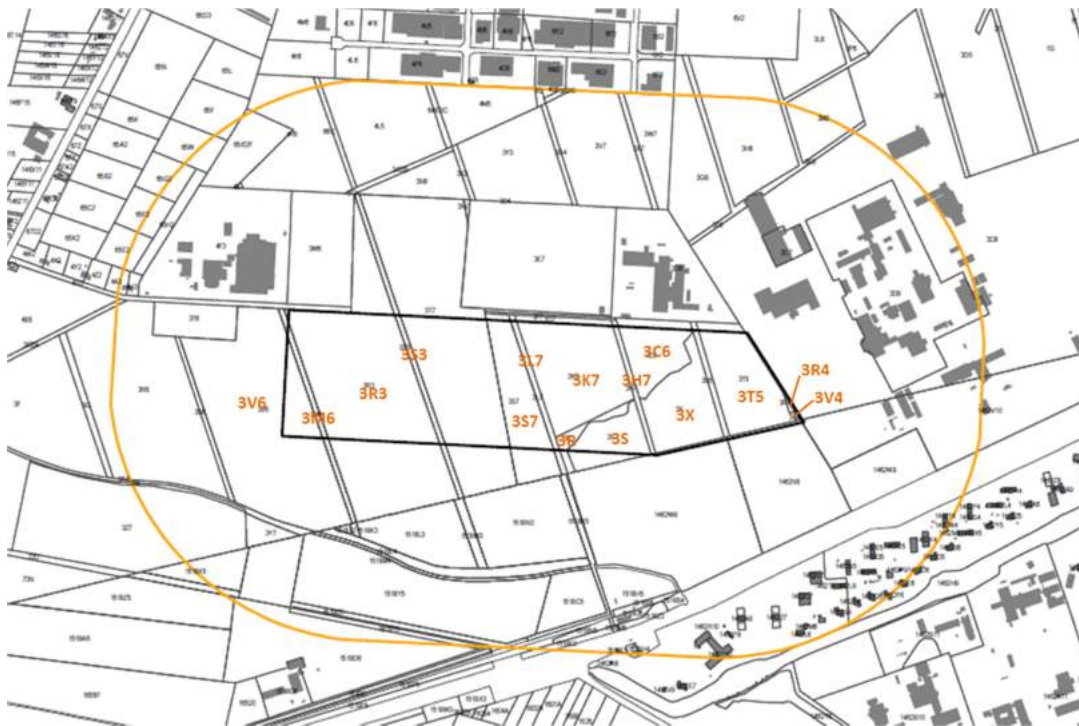
Figuur 4 - 4: Huidige eigendomsstructuur van het gebied rond de bergingssite (aangegeven door een vijfhoek in een dunne groene lijn). BN: Belgonucleaire; FBFC: FBFC International.

#### 4.2.2 Inplanting van de installaties op de bergingssite

Het geheel van bergingsinstallaties en ondersteunende uitrustingen direct eraan verbonden vormt de bergingsinrichting van radioactieve afvalstoffen, die volgens het ARBIS onderworpen is aan het vergunningsstelsel van nucleaire klasse I inrichtingen. Na het aanleggen van de afdekking, maakt ook de afdekking onderdeel uit van een bergingsinstallatie.

De bergingssite bevindt zich op het einde van de Europalaan die de nucleaire bedrijven FBFC International, Belgonucleaire en Belgoprocess met de baan Geel-Retie verbindt (Figuur 4 - 2). De site grenst aan de zuidelijke zijde van de Europalaan en aan de oostelijke zijde aan Belgoprocess. Om de kade vlot bereikbaar te maken via de weg heeft NIRAS een nieuwe toegangsweg laten aanleggen die de kade met de Europalaan verbindt. Deze huidige weg, ook Europalaan genoemd, vormt de westelijke en zuidelijke grens van de eerste ‘tumulus’ van de bergingssite (Figuur 4 - 3, stippellijn). Deze weg zorgt tevens voor de ontsluiting van de caissonfabriek. In een latere fase zal de weg verder westwaarts doorgetrokken worden.

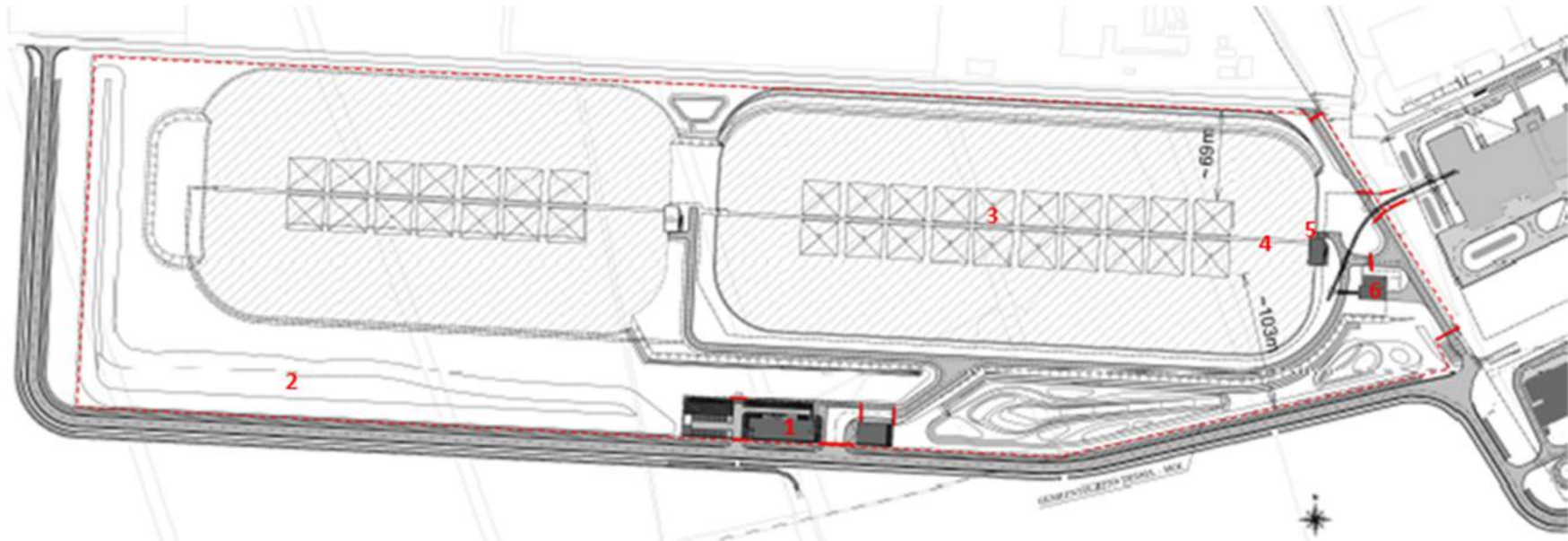
De bergingssite zelf bestaat uit een oppervlakte van ongeveer 25 hectare (gebied binnen de oranje vijfhoek op Figuur 4 - 3). De verschillende kadastrale percelen zijn gegeven in Figuur 4 - 5, een detail van de van de verschillende installaties, gebouwen, uitrustingen en wegen op de site in Figuur 4 - 6.



Figuur 4 - 5: Kadastraal uittreksel van de omgeving van de bergingssite (aangeduid door een zwarte vijfhoek, op basis van kaart 1 (ARCADIS) van de vergunningsaanvraag).

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

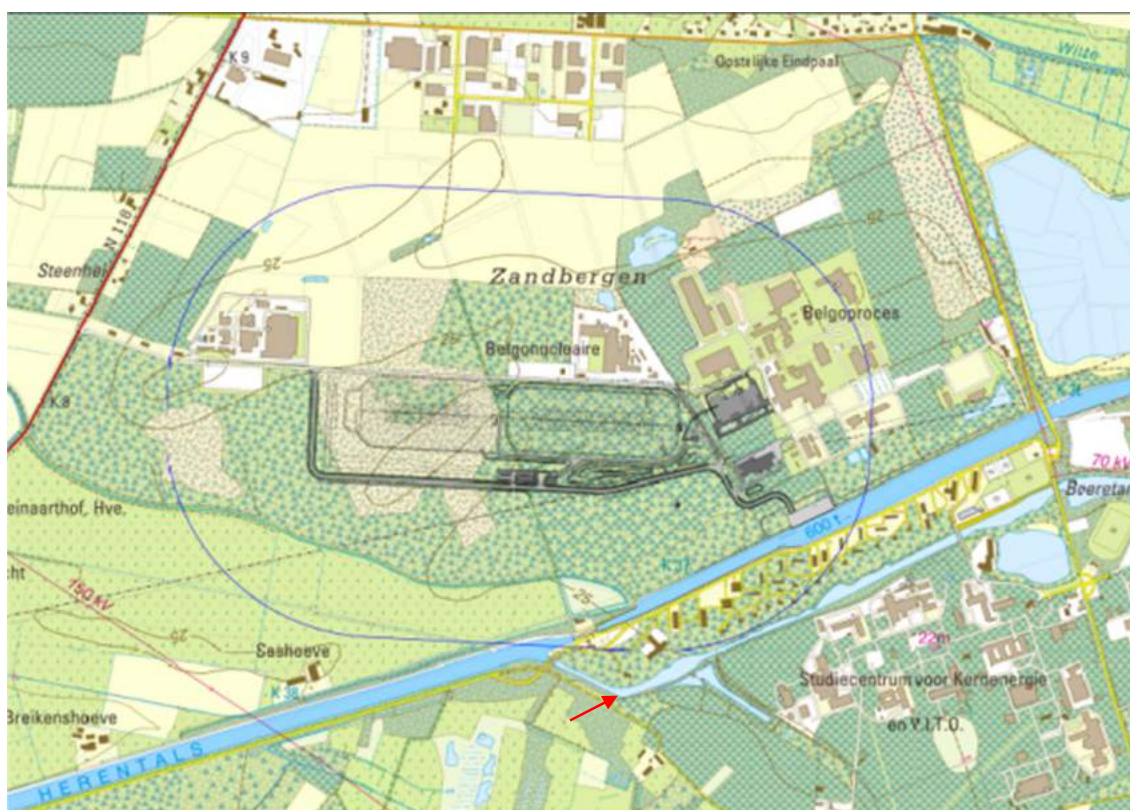


Figuur 4 - 6: Detail van de bergingssite met aanduiding van de buitenperimeter (rode streepjeslijn) en de poorten (volle rode lijntjes), alsook van de verschillende installaties, gebouwen, uitrustingen en wegenis op de site. Meer gedetailleerde tekeningen zijn terug te vinden onder 'plannen' in het veiligheidsdossier. (1): administratief gebouw; (2): infiltratiebekken; (3): modules; (4): inspectiegalerij; (5): watercollectiegebouw & (6): werkplaats/garages.

### 4.3 Geografie, demografie en huidige en voorziene menselijke activiteiten

#### 4.3.1 Gegevens betreffende de bevolkingsdichtheid rond de bergingsite

Binnen een perimeter van 500 m rondom de bergingsinrichting zijn gebouwen met een woonfunctie beperkt tot het SE-deel van deze perimeter, met name de residentiewijk tussen het kanaal Bocholt-Herentals en 'de Congovaart' (Figuur 4 - 7). Doordat sommige wooneenheden vooral door doctoraatsstudenten worden bewoond, kan het aantal bewoners periodisch sterk variëren. In totaal wordt hun aantal binnen de 500 m-perimeter geschat op ongeveer 80 tot 90. Dit komt neer op een dichtheid van ongeveer 40 tot 45 inv/km<sup>2</sup>.



Figuur 4 - 7: Visualisatie van de 500 m-perimeter rondom de bergingsinrichting cAt. De Congovaart is aangeduid door middel van een rode pijl.

## 4.3.2 Fysische geografie

### 4.3.2.1 Reliëf en geomorfologie

#### 4.3.2.1.1 Het Netebekken

De bovenlopen van de Grote Nete ontspringen op het Kempisch Plateau op een hoogte van meer dan +50 m TAW (Figuur 4 - 8). De Grote Nete en Molse Nete vloeien samen ter hoogte van Geel, op een hoogte van rond de +20 m. Vanaf daar stromen ze verder in zuidwestelijke richting onder de naam Grote Nete. Ten zuidwesten van Westerlo maakt de Grote Nete een bocht en stroomt vervolgens in noordwestelijke richting en dan in westelijke richting tot in Lier. De Kleine Nete/Witte Nete ontspringt in het vlakkere landschap van het glacis van Beringen-Diepenbeek op een hoogte van ongeveer +25 m. De Breilooop en de Kleine Nete/Witte Nete<sup>1</sup> vloeien samen op de grens Kasterlee-Retie (~ +17 m). Daarna stroomt de Kleine Nete in zuidwestelijke richting verder tot Lier, waar ze samen vloeit met de Grote Nete (~ +5 m). Ten zuiden van Lier stroomt de Nete verder richting Rumst om daar uit te monden in de Rupel, samen met de Dijle en de Zenne. De topografische hoogte bedraagt dan al minder dan +5 m. Getijdeninvloeden zijn merkbaar tot Grobbendonk (Kleine Nete) en Berlaar (Grote Nete). Het gemiddelde verval van de Kleine Nete, het stroombekken waarin de geplande site gelegen is, bedraagt slechts 20 cm per km. Hiermee kan de Kleine Nete benoemd worden als een laaglandrivier met zeer lage dynamiek.

Het Netebekken doorkruist verschillende morfologische eenheden ([R4-1]; Figuur 4 - 8). Het oostelijk Netebekken omvat een deel van het Kempisch Plateau, gelegen op een hoogte van meer dan +50 m TAW<sup>2</sup> (Figuur 4 - 9). Het Kempisch Plateau vormt tevens de waterscheiding met het Maasbekken. Ten gevolge van het sterk positieve reliëf van dit plateau, dat tevens als infiltratiegebied voor het Netebekken fungeert, is het Netebekken sterk onderhevig aan kwel. De westelijke rand van het plateau wordt gevormd door het glacis<sup>3</sup> van Beringen-Diepenbeek (16b in Figuur 4 - 9), dat de overgang vormt naar de lager gelegen gebieden ten westen ervan. Het lager gelegen gebied wordt de depressie van de Schyns-Nete genoemd met een hoogte tussen +20 m in het oosten en +5 m in het westen (15b in Figuur 4 - 9). Enkele interfluvia<sup>4</sup> zijn duidelijk merkbaar binnenin de depressie, met name de ruggen van Lichtaart (~ +30 m; 15bL in Figuur 4 - 9) en Geel (~ +25 m; 15bG in Figuur 4 - 9). Het geeft de depressie het uitzicht van een afwisselend landschap van grosso modo zuidwest-noordoost gerichte ruggen en dalen die volgens meer en minder resistente geologische lagen in de ondergrond in reliëf zijn gezet of uitgesleten.

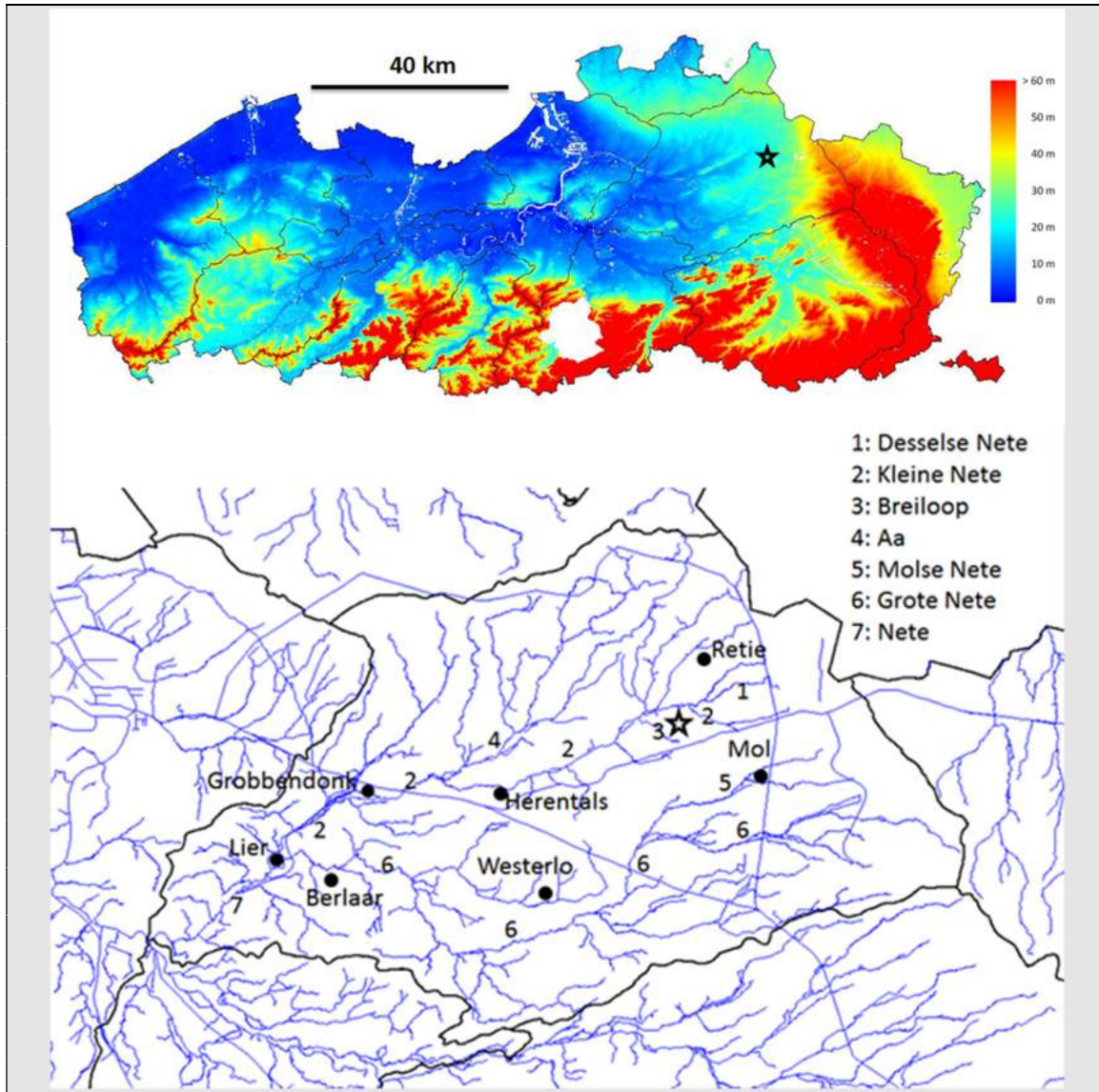
---

<sup>1</sup> Beide benamingen worden door elkaar gebruikt: De Vlaamse Hydrografische Atlas vermeld enkel de benaming “Kleine Nete”, op de topografische kaart echter wordt het deel van de waterloop ten oosten en noordoosten van de site benoemd als “Witte Nete”, ten noorden (na samenvloeiing met de Looiense Nete) wordt het de “Kleine Nete” (zie Figuur 4 - 11)

<sup>2</sup> De Tweede Algemene Waterpassing (TAW), uitgevoerd in 1947 door het Nationaal Geografisch Instituut, is de referentiehoogte tegenover dewelke in België hoogtemetingen worden uitgedrukt. Een TAW-hoogte van 0 m is gelijk aan het gemiddeld niveau van het laagwater te Oostende.

<sup>3</sup> Zachthellende erosieve vlakte gevormd door stromend water onder (sub)arctische omstandigheden.

<sup>4</sup> Topografische hoogte tussen twee alluviale vlakten of valleien.



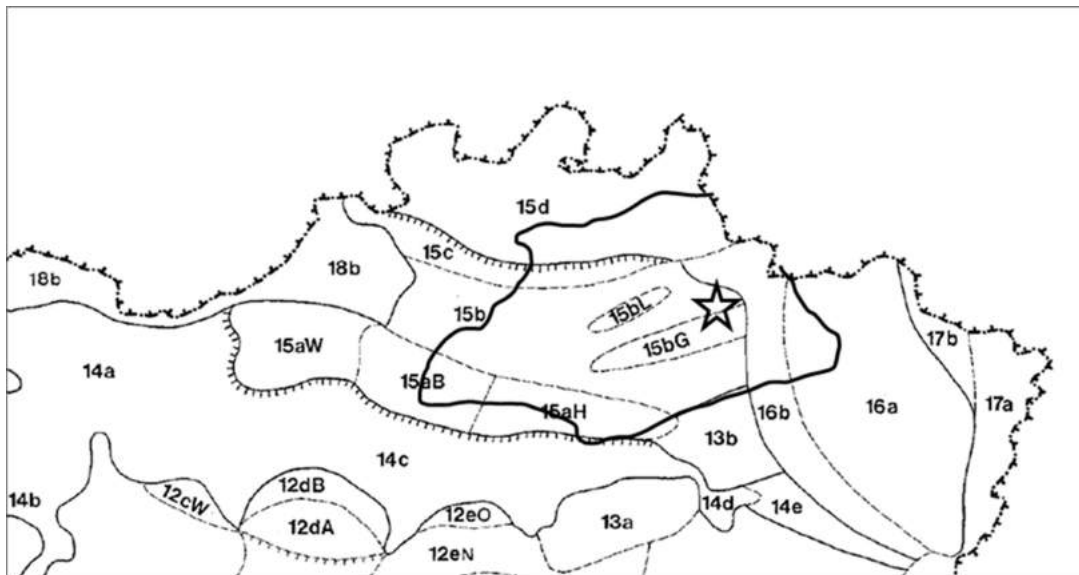
Figuur 4 - 8: Het Netebekken gesitueerd binnen het reliëf van Vlaanderen (boven) en gedetailleerde hydrografie (onder) [R4-1]. De bergingssite (ster) is gelegen op het interfluvium tussen de deelbekkens van de Grote Nete en Kleine Nete, ingesloten tussen de Kleine Nete en de Breilooop.

In het noorden wordt deze depressie begrensd door het glaciair van Brasschaat (15c in Figuur 4 - 9) dat zelf de overgang naar de cuesta<sup>5</sup> van de kleien van de Kempen vormt (15d in Figuur 4 - 9). De riviertjes op deze cuesta behoren reeds tot het Maasbekken. De maximale topografische hoogte van deze cuesta bedraagt tussen 30 en 35

<sup>5</sup> Assymetrische verhevenheid in het landschap met een min of meer steile helling aan één kant en een zacht aflopende helling aan de andere die ontstaat door erosie van een licht hellende resistenter geologische laag.



m. In het zuiden is de depressie begrensd door de cuesta van de Boomse Klei (15a in Figuur 4 - 9), met de subcuesta's van het land van Boom (15aB in Figuur 4 - 9) en Heist-op-den-Berg (15aH in Figuur 4 - 9). Deze lopen in oostelijke richting over in de heuvels van Lummen (13b in Figuur 4 - 9) die in feite al tot het Demerbekken behoren. De topografische hoogte van de waterscheiding tussen het Netebekken en het zuidelijk gelegen Demer-Dijlebekken is grillig en daalt van ongeveer +50 m in het oosten tot minder dan +10 m in het westen. Ten westen bevindt de waterscheiding met de Schelde zich eveneens op een hoogte van minder dan +10 m. Het totale hoogteverschil binnenin het bekken bedraagt ongeveer 50 m.

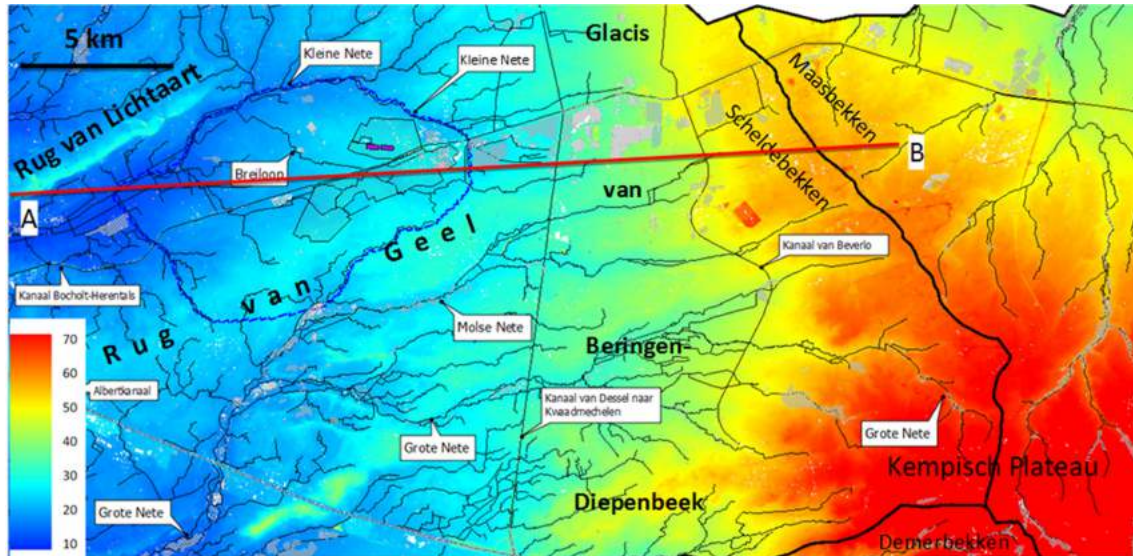


- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 12: Groot heuvelig interfluvium     | 15c: Glacis van Brasschaat               |
| 13a: Heuvels van het Hageland       | 15d: Cuesta van de kleien van de Kempen  |
| 13b: Heuvels van Lummen             | 16a: Plateau van de Kempen               |
| 14a-d: Vlaamse Vallei met uitlopers | 16b: Glacis van Beringen-Diepenbeek      |
| 14e: Demervallei                    | 17a: Vlakke van de Limburgse Maas        |
| 15a: Cuesta van de klei van Boom    | 17b: Vervlakkingen van Gerdingen-Bocholt |
| 15b: Depressie van de Schyns-Nete   | 18b: Scheldepolders                      |
| 15bL: Rug van Lichtaart             |  |
| 15bG: Rug van Geel                  |  |

**Figuur 4 - 9: Morfologische eenheden in de Kempen en aangrenzende gebieden [R4-1]. De bergingssite is gelegen op een noordelijke uitloper van de rug van Geel, die verder aansluiting vindt met het glacis van Beringen-Diepenbeek. Het Netebekken (volle dikke lijn) is topografisch ingesloten door het Kempisch Plateau (16a), de cuesta van de Boomse Klei (15a), en de cuesta van de kleien van de Kempen (15d). De locatie van de bergingssite is aangegeven door een ster.**

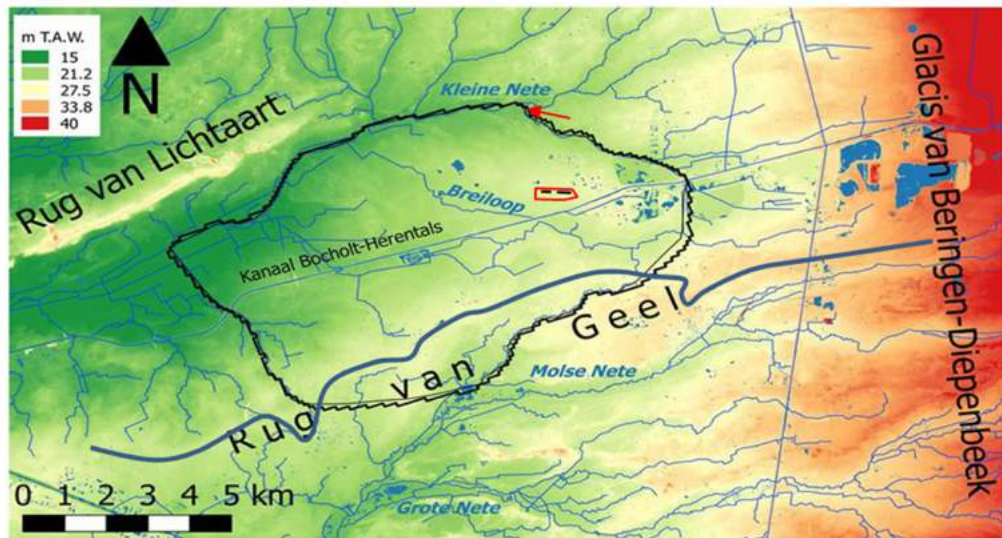
De bergingssite is gelegen op het interfluvium tussen de Kleine Nete/Witte Nete in het noorden en de Breilooop, - een bijrivier van de Kleine Nete-, in het zuiden (Figuur 4 - 9, Figuur 4 - 10 en Figuur 4 - 11). De absolute hoogte van het interfluvium daalt van om en bij +27 m TAW ten zuidoosten van het kanaal Bocholt-Herentals, naar ongeveer +20 m in het noordwesten, waar het geleidelijk overgaat in de vallei van de Kleine Nete. Ten noorden en ten zuiden van het interfluvium zijn duidelijk de valleitjes van de Kleine Nete (+20 m) en de Breilooop (+23 m) te zien (Figuur 4 - 11). De Kleine Nete heeft zich duidelijk reeds dieper ingesneden in deze noordelijke

uitloper van de Rug van Geel dan de Breilloop (Figuur 4 - 12). Ter hoogte van de bergingsite benadert de gemiddelde hoogte +25 m, met vooral ten oosten ervan talrijke ophogingen van één tot twee meter ten gevolge van historische zandverstuivingen (stuifzanden).

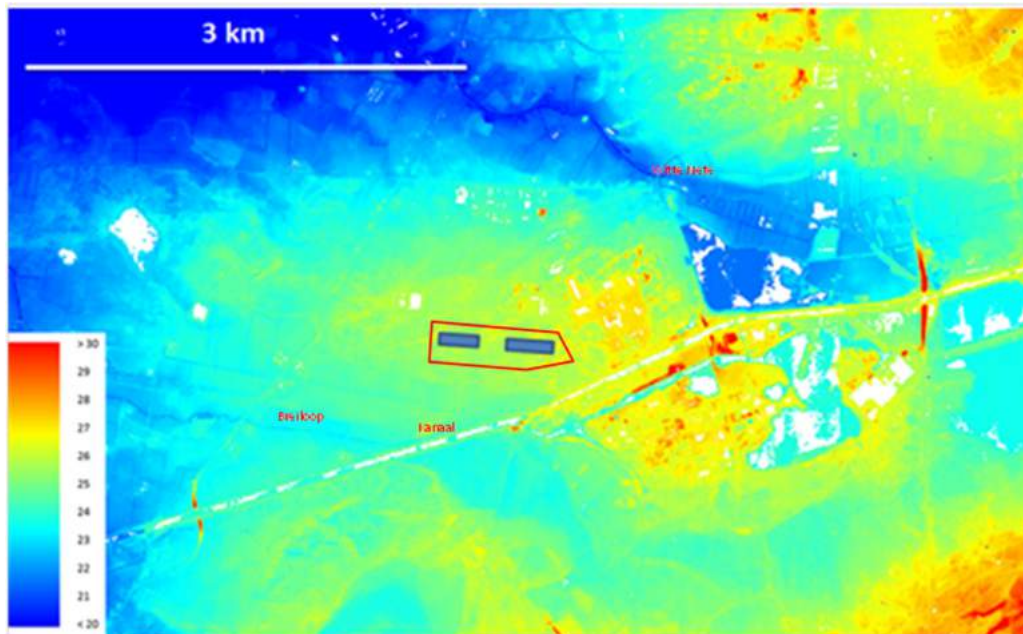


Figuur 4 - 10: Topografie van het oostelijk deel van het Netebekken en aangrenzende gebieden [R4-1]. De zwarte lijnen geven grenzen tussen verschillende bekkens weer (Netebekken als deel van het Scheldebekken), de blauwe stippeellijnis de zone van het lokale grondwatermodel en het gearceerde gebied omvat de zone voor nucleaire activiteiten van Mol-Dessel-Geel met aanduiding van de bergingsite (tumuli in het paars). Verder zijn enkele morfologische entiteiten (het Kempisch Plateau, het Glacis van Beringen-Diepenbeek, de Rug van Lichtaart en de Rug van Geel) en een aantal waterlopen aangeduid. Deze kaart toont duidelijk de dominante morfologie van het Kempisch plateau tegenover de westelijk gelegen depressie. De rode lijn A-B geeft de locatie van het profiel in Figuur 4 - 13 weer.

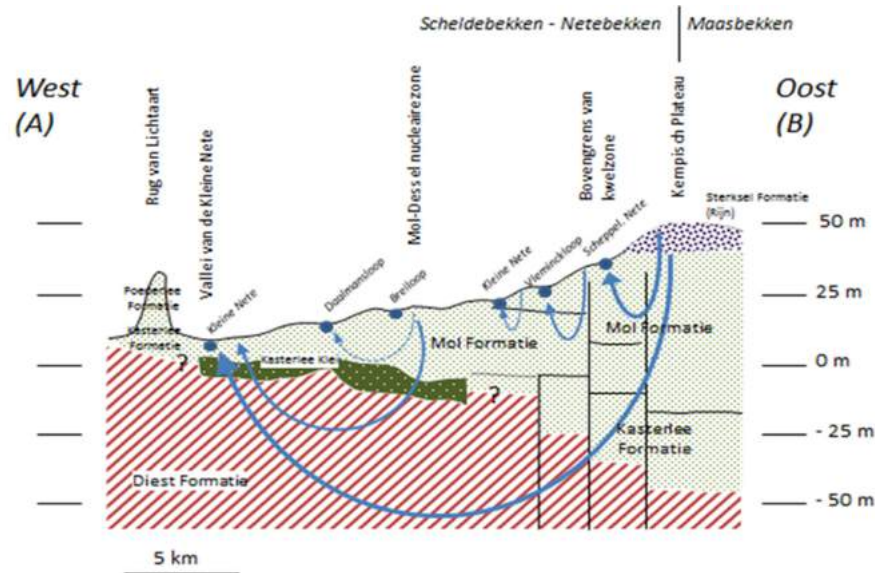
Het verband tussen de geomorfologie, hydrologie en hydrostratigrafie is weergegeven in Figuur 4 - 13. De hoogteligging van de infiltratiezone op het Kempisch Plateau zorgt voor een hoge hydrostatische druk in de lager gelegen depressie en voor een belangrijke kwel. De depressie verlaagt stapsgewijs in westelijke richting, met een afwisseling van interfluvia en ondiepe alluviale vlaktes. De interfluvia fungeren als infiltratiegebied, hun bijdrage aan de grondwaterstroming neemt af in westelijke richting. Ook zijn er nog de diepere grondwaterstromingen die vanaf het Kempisch Plateau rechtstreeks bijdragen tot het debiet van bv. de Kleine Nete, en daarbij de hydraulische barrière van de Kasterlee Klei moeten overwinnen. In westelijke richting neemt de bijdrage van deze diepe grondwaterstromingen toe ten opzichte van de ondiepe stromingen die steeds minder belangrijk worden in die richting.



Figuur 4 - 11: Gedetailleerde topografie van het interfluvium tussen de Kleine Nete/Witte Nete en Molse Nete/Grote Nete. Het interfluvium waarop de bergingssite (rode vijfhoek) zich bevindt, sluit aan bij de Rug van Geel, die zelf overgaat in het Glacis van Beringen-Diepenbeek. De blauwe volle lijn geeft de waterscheiding aan tussen de bekken van Kleine Nete (Noorden) en Grote Nete (Zuiden). De rode pijl geeft de plaats aan waar de Witte Nete, na samenvloeiing met de Looiendse Nete, de Kleine Nete wordt (topografische kaart 17 1-2, schaal 1:20 000, NGI).



Figuur 4 - 12: Gedetailleerde topografie van het interfluvium tussen de Witte Nete en de Breiloop [R4-1]. Structuren ten gevolge van menselijke ingrepen in het landschap zijn zichtbaar (landbouwpercelen, ontginningsputten, kanalen, wegen, gebouwen etc.). De bergingssite (aangeven door rode vijfhoek) is op een topografisch hoog gelegen van +25m TAW tussen de valleien van de Witte Nete (noorden) en de Breiloop (zuiden). Witte vlekken zijn wateroppervlakten.



Figuur 4 - 13: Verband tussen de hydrostratigrafie, hydrologie en geomorfologie van het oostelijk Netebekken [R4-1]. De onderverdeling van de bovenste aquifer is onzeker in het westelijk gedeelte. De relatieve bijdrage van de verschillende stromingstrajecten aan kwel is weergegeven door de dikte van de stromingslijnen. De basis van de Neogene aquifer (top Boomse Klei) – niet getoond op deze figuur – bevindt zich op minstens -150 m ten westen van de breuken en dieper ten oosten ervan (zie Figuur 4 - 9 voor de locatie van het profiel).

#### 4.3.2.1.2 Geomorfologische processen: erosie en sedimentatie

Bodemerosie kan het gevolg zijn van waterstroming en windwerking. Regenwater dat langsheen een helling omlaag stroomt, kan erosie veroorzaken over een groot oppervlak (*'sheet erosion'*), gelokaliseerd (*'rill erosion'*) of in de vorm van een geul (*'gully erosion'*). De volgende factoren zijn determinerend voor het type erosie:

- intensiteit, frequentie en duur van de regenval;
- lengte, ruwheid en de hellingsgraad;
- vegetatie-type en densiteit ervan; cohesie van de bodempartikels;
- infiltratie-capaciteit van de bodem en structurele stabiliteit van de bodem.

De hoeveelheid erosie wordt dus bepaald door de erosiviteit van de regen en de erodeerbaarheid van de bodem. De erosiviteit hangt af van de fysische karakteristieken van de neerslag, terwijl de erodeerbaarheid bepaald wordt door de interne weerstand van de bodem tegenover externe krachten.

Algemeen kan gesteld worden dat de watererosiegevoeligheid van de regio, i.e., het interfluvium waar de site gelegen is, en het ruimere bekken van de Nete, zeer laag is. Gemeenten in het Netebekken zijn allemaal gekenmerkt door de laagste gevoeligheidsgraad met betrekking tot erosie [R4-2]. Dit valt te verklaren door de

relatief lage reliëfsintensiteit van de regio (zwakke hellingen), de relatief permeabele ondergrond die voornamelijk uit zand bestaat, en de stabiliteit van de bodem door podzoliatie en begroeiing<sup>6</sup>.

Simulaties van erosie door neerslag die valt op een zandig substraat met 3:1 helling en die achtereenvolgens begroeid is met zaadlingen (1 jaar), gras (299 jaar) en bos (9700 jaar) suggereren dat het totale verlies aan bodemmateriaal door 'sheet erosion' minder dan 1 m in 10 000 jaar bedraagt [R4-3]. Dit is consistent met de gemiddelde geobserveerde erosiesnelheid in België, die 0,1 mm per jaar bedraagt [R4-4].

Voornamelijk extreme gebeurtenissen wat betreft neerslag kunnen voor een redistributie van bodemmateriaal en oppervlakkige sedimenten zorgen. Erosie vindt plaats op interfluvia en hellingen, en het geërodeerde materiaal wordt afgezet in rivierbeddingen of overstromingsvlakten. Bij piekdebieten kan de rivier de eigen bedding eroderen, en spreekt men van rivierinsnijding. In de huidige klimatologische omstandigheden zijn insnijdingen niet significant op lange termijn, en bedragen ze niet meer dan 1 m in 10 000 jaar<sup>7</sup> [R4-5].

Het is belangrijk te vermelden dat de snelheid van deze processen kan veranderen bij andere randvoorwaarden, zoals een klimaatsverandering ('global warming' of de terugkeer van periglaciale omstandigheden) of een opheffingspuls indien langere tijdsperioden worden beschouwd (enkele 10 000 jaren). Het effect van bepaalde processen is eveneens afhankelijk van de tijdschaal waarop men de processen beschouwt. Terwijl rivierinsnijding nu op een tijdschaal van enkele decennia niet significant is, heeft het tijdens de vorige ijstijd wel tot een verdieping van de vallei van de Grote Nete geleid van meer dan 10 m nabij Westerlo, en dit over een periode van enkele 10 000 jaar (zie §4.3.2.4.2). Zelfs bij een geschatte toename van 50% van de erosiviteit door neerslag als gevolg van klimaatsveranderingen in de volgende eeuw(en), zal de totale erosie op langere tijdschaal nog steeds beperkt blijven [R4-6]; [R4-7].

Ook erosie door wind is functie van de erosiviteit van de wind en de erodeerbaarheid van de bodem. Windwerking bestaat uit drie processen: het losmaken en wegblazen van een partikel uit het substraat, transport en afzetting. De gevoeligheid van een oppervlak voor winderosie is afhankelijk van het vochtgehalte, de ruwheid, de textuur (korrelgrootte) en de cohesie van de bodem. Vooral onbegroeide, en bovendien droge en weinig cohesieve oppervlakken zijn gevoelig voor winderosie. De transportcapaciteit van lucht is evenredig met de derde macht van de windsnelheid en omgekeerd evenredig met de vierkantswortel van de korrelgrootte. De windsnelheid is op zijn beurt afhankelijk van de microtopografie [R4-8].

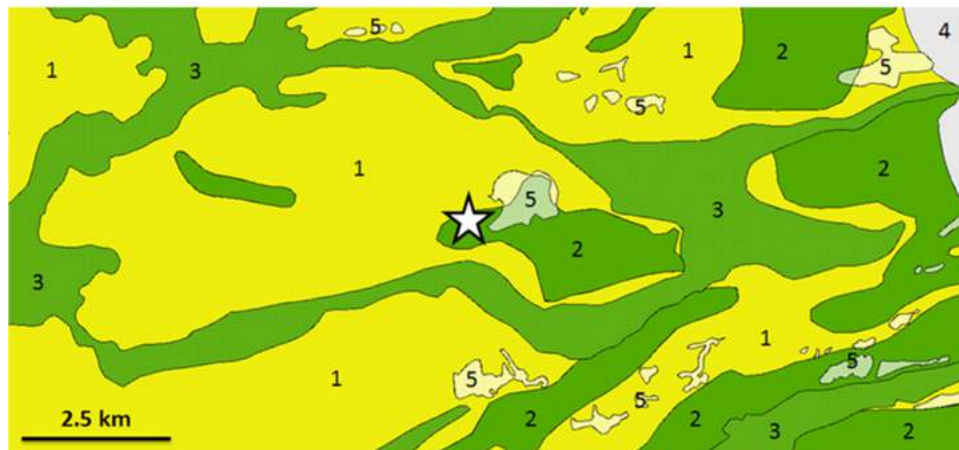
De relatief droge en onsamenhangende zandgronden van de Kempen met een onverzadigde zone van één tot 2 m diepte kunnen gemakkelijk geërodeerd worden door windwerking indien ze niet gestabiliseerd zijn door vegetatie en/of bodemvorming. Dit was o.a. het geval in de periode tussen A.D. 1400 en 1700 toen ingebruikname van bos- en heidegronden voor landbouwdoeleinden en plaggencultuur tezamen met overbegrazing aanleiding heeft gegeven tot het ontstaan van uitwaaiingskommen en duinophogingen (stuifzanden). Vanaf de 18<sup>e</sup> eeuw, maar vooral tijdens de 19<sup>e</sup> en 20<sup>e</sup> eeuw werden de kale zandgronden beplant met dennen, wat tot een stabilisering van het landschap heeft geleid.

<sup>6</sup> Ter vergelijking vermelden we dat intensief bewerkte leemgronden op steile hellingen in de leemstreek zeer sterk erosiegevoelig zijn.

<sup>7</sup> Tijdens het Holoceen (laatste 10 000 jaar) hebben de waterlopen zich in feite niet of nauwelijks ingesneden.

#### 4.3.2.2 Oppervlakkige geologie

De ondiepe geologie wordt hier besproken omdat het enerzijds het substraat voor bodemvorming is, en anderzijds omdat deze meestal uit Quartaire sedimenten bestaat en dus nauw verbonden is met de geomorfologische evolutie van de site [R4-1]. De Quartairgeologische sedimenten in het Netebekken bestaan bijna uitsluitend uit zand (Figuur 4 - 14). Bovenop het Kempisch Plateau zijn deze zanden vrij grof (korrelgrootte modus ongeveer 350  $\mu\text{m}$ ) en worden daar de Lommel Zanden genoemd. Ze werden afgezet door de Rijn, ongeveer 1 miljoen jaar geleden (nr. 4 in Figuur 4 - 14). Andere fluviatiele zanden worden eveneens aangetroffen in de alluviale vlaktes, waar ze eventueel bedekt kunnen zijn door fijnere (leem of klei) overstromingssedimenten (nr. 3 in Figuur 4 - 14). Op sommige plaatsen is de dikte van deze zanden aanzienlijk (~ 10 m) door herhaalde insnijdings- en opvullingsfasen tijdens het Quartair. De alluviale vlaktes worden verder gekenmerkt door het voorkomen van veenlagen. De fluviatiele afzettingen dateren uit het Weichsel en het Holoceen. Op de interfluvia bevinden zich dekzanden uit het Weichsel (Formatie van Wildert; nr. 2 in Figuur 4 - 14), duinzanden uit het Laat-Weichsel en Holocene stuifzanden (nr. 5 in Figuur 4 - 14). Deze zanden zijn doorgaans fijner dan de fluviatiele zanden met een modus die schommelt rond 150  $\mu\text{m}$ . De dikte van de dekzanden is meestal beperkt tot 1 tot 2 m terwijl de duin- en stuifzanden op sommige plaatsen diktes van 4 tot 10 m kunnen bereiken. Op sommige interfluvia bedekken deze eolische afzettingen<sup>8</sup> oudere fluviatiele afzettingen. Dit zou het geval zijn voor het interfluvium waarop de site gelegen is. Verder onderzoek is echter noodzakelijk om de aanwezigheid en de ouderdom van deze fluviatiele afzettingen al dan niet te bevestigen. De Weichseliaan ouderdom van de dekzanden ter hoogte van de site zijn bevestigd met een OSL<sup>9</sup> datering en bedraagt  $19 \pm 2$  ka [R4-9].



- 1: eolisch dekzand (Weichsel)
- 2: door (1) bedekte fluviatiele afzettingen (Weichsel)
- 3: alluvium (Holoceen) rustend op oudere fluviatiele afzettingen
- 4: afzettingen van de Rijn (Vroeg-Pleistoceen), eventueel herwerkt
- 5: duinen (Holoceen) rustend op (1-4)

Figuur 4 - 14: Quartairgeologische kaart van de omgeving rondom de bergingssite (witte ster), [R4-10].

<sup>8</sup> Door de wind afgezette sedimenten

<sup>9</sup> OSL : Optical Stimulated Luminescence

### 4.3.2.3 Bodemkunde

#### 4.3.2.3.1 Bodems in het Netebekken

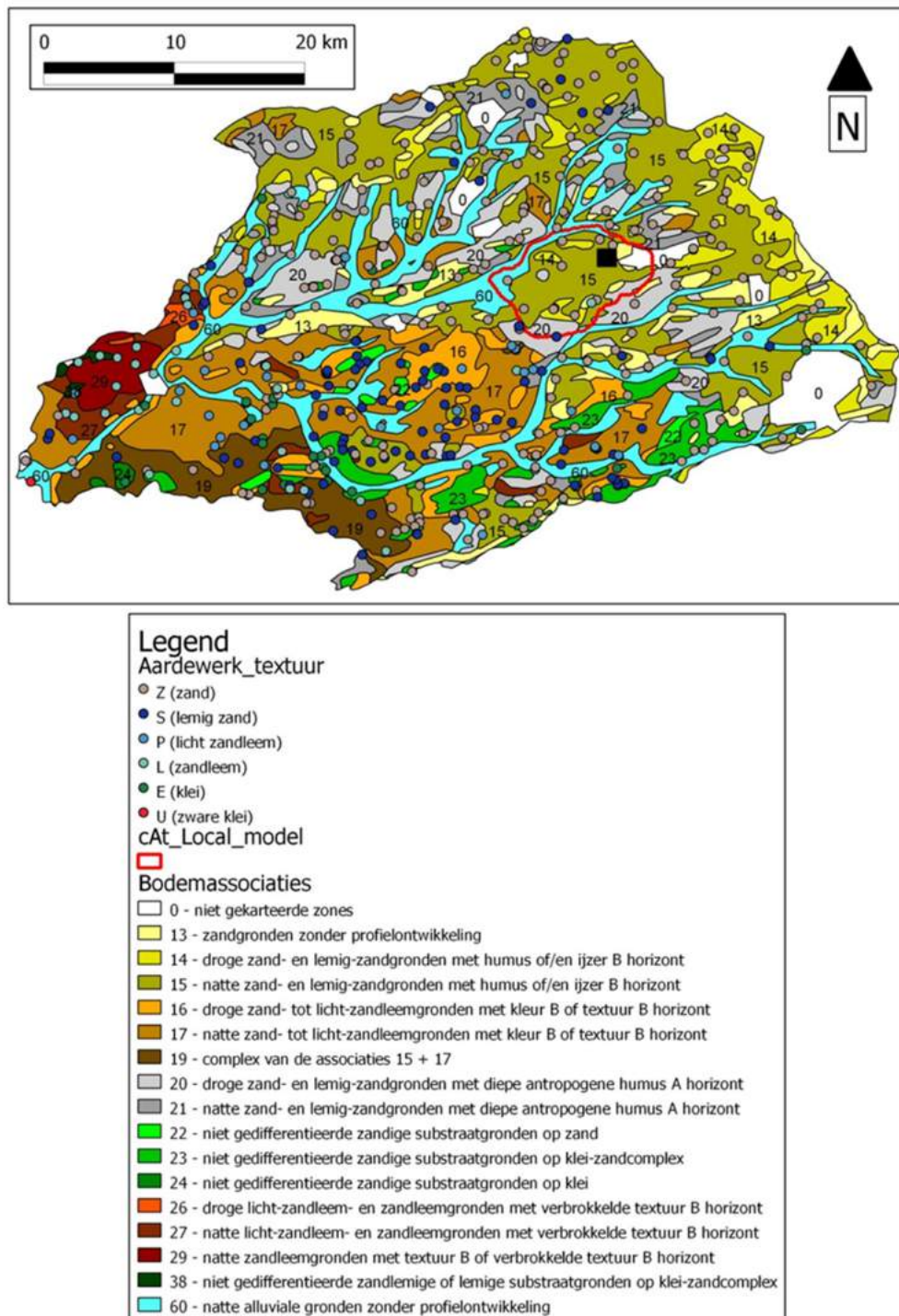
De kaart met bodemassociaties<sup>10</sup> voor het gehele Netebekken toont verschillende groepen met een typische verbreiding (Figuur 4 - 15; [R4-11]). Het noordelijk deel van het bekken wordt gedomineerd door (lemige) zandgronden met een duidelijke humus en/of ijzer B horizont (associaties 14 en 15) en (lemige) zandgronden met een diepe antropogene A-horizont (associaties 20 en 21; plaggenbodem<sup>11</sup>). De bodemassociaties in het zuidelijk deel van het bekken zijn duidelijk verschillend, zowel wat textuur als profiel betreft. Hier treffen we voornamelijk zand tot licht zandleemgronden aan met een kleur B of textuur B horizont (associaties 16 en 17). Zowel in het noorden als in het zuiden van het bekken komen in de alluviale vlakten combinaties van voorgaande types voor, terwijl op de interfluvia verspreid duingronden voorkomen (associatie 13). De kwantitatieve distributie van bodemassociaties voor het gehele Netebekken en het Lokale grondwatermodel is gegeven in Tabel 4 - 1.

**Tabel 4 - 1: Distributie van bodemassociaties in het Netebekken en in het gebied van het Lokale grondwatermodel [R4-220];**

Bodemassociatie	Opp. in NB (km <sup>2</sup> )	Opp. in NB (%)	Opp. in LM (km <sup>2</sup> )	Opp. in LM (%)
0 – niet gekarteerde zone	63	4	3	4
13 – zandgronden zonder profielontwikkeling	88	5	3	5
14 – droge zand- en lemig-zandgronden met humus of/en ijzer-B horizont	89	5	6	9
15 – natte zand- en lemig-zandgronden met humus of/en ijzer-B horizont	395	24	40	59
16 – droge zand tot licht-zandleemgronden met kleur B of textuur B horizont	84	5	0	0
17 – natte zand tot licht-zandleemgronden met kleur B of textuur B horizont	248	15	0	0
19 – complex van de associaties 15 en 17	80	5	0	0
20 – droge zand- en lemig-zandgronden met diepe antropogene humus A horizont	158	9	8	12
21 – natte zand- en lemig-zandgronden met diepe antropogene humus A horizont	84	5	0	0
22 – niet gedifferentieerde zandige substraatgronden op zand	13	1	0	0
23 – niet gedifferentieerde zandige substraatgronden op klei-zandcomplex	67	4	0	0
24 – niet gedifferentieerde zandige substraatgronden op kleicomplex	3	0	0	0
26 – droge licht-zandleem- en zandleemgronden met verbrokkelde textuur B horizont	5	0	0	0
27 – natte licht-zandleem- en zandleemgronden met verbrokkelde textuur B horizont	34	2	0	0
29 – natte zandleemgronden met (verbrokkelde) textuur B horizont	24	1	0	0
38 – niet gedifferentieerde zandlemige of lemige substraatgronden op klei-zandcomplex	3	0	0	0
60 – natte alluviale gronden zonder profielontwikkeling	233	14	8	12
alle	1672	100	68	100

<sup>10</sup> Ruimtelijke groepering van bodemseries.

<sup>11</sup> Grond verbeterd met heideplaggen, i.e., afgestoken zoden van een heideveld. Deze manier van bemesting werd toegepast op arme zandgronden tussen de 16<sup>de</sup> en 19<sup>de</sup> eeuw [Koster, 2009].



Figuur 4 - 15: Bodemassociatiekaart van het Netebekken [R4-11]. De rode omlijnning geeft het gebied weer van het lokaal hydrogeologisch model, het zwarte vierkant de locatie van de bergingssite.



Een meer gedetailleerd beeld voor bodemtypes in het Kleine Netebekken in termen van textuur en gebaseerd op bodemseries wordt gegeven in Tabel 4 - 2. De zandgronden (zand (Z) en lemig zand (S)) vertegenwoordigen 94% van de bodemtypes. Pure kleibodems (U textuur) zijn significant afwezig.

**Tabel 4 - 2: Distributie van bodemseries in het bekken van de Kleine Nete [R4-220].**

Bodemserie	Oppervlakte (km <sup>2</sup> )	Bedekkingsgraad (%)
Zand (Z)	422,9	72
Lemig zand (S)	128,4	22
Zandleem (P)	22,5	4
Zandige klei (E)	11,5	2
Leem (L)	1,0	0
Kleiïge leem (A)	0,6	0
Klei (U)	0,0	0

#### 4.3.2.3.2 Bodems in en rond de bergingssite

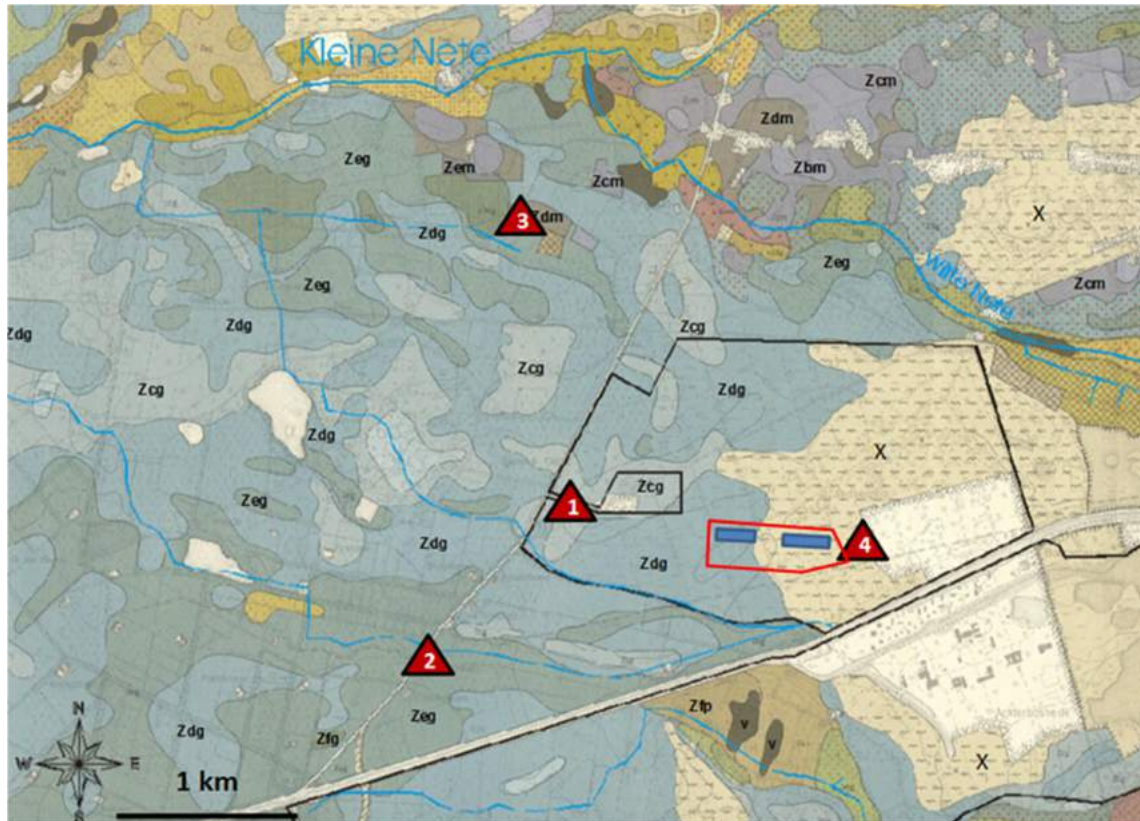
Een fragment van de bodemkaart van de regio rond de bergingssite is gegeven in Figuur 4 - 16 [R4-220]. Een lijst met de meest voorkomende bodemtypes in die regio is gegeven in Tabel 4 - 3. Profielen van een aantal in de regio voorkomende bodemtypes zijn weergegeven in Figuur 4 - 17.

De geplande site ligt op de grens tussen twee veel voorkomende bodemtypes op het interfluvium tussen Kleine Nete en Breilooop. Deze zijn duingronden (X) en matig natte zandbodems met duidelijke ijzer- en/of humus-B horizont (Zdg). Zeer natte (Zfg), natte (Zeg), en matig droge (Zcg) zandbodems met profielontwikkeling komen vooral ten westen van de site voor.

**Tabel 4 - 3: Lijst van meest belangrijke bodemtypes in de regio [R4-12].**

Bodemtype	Beschrijving
X	Duingrond
Zcg	Matig droge zandgronden met duidelijke humus en/of ijzer B horizon
Zdg	Matig natte zandgronden met duidelijke humus en/of ijzer B horizon
Zeg	Natte zandgronden met duidelijke humus en/of ijzer B horizon
Zfg	Zeer natte zandgronden met duidelijke humus en/of ijzer B horizon
Zcm	Matig droge zandgronden met diepe antropogene A horizon
Zdm	Matig natte zandgronden met diepe antropogene A horizon
Zem	Natte zandgronden met diepe antropogene A horizon
Sem	Natte lemige zandgronden met diepe antropogene A horizon
vPfg	Zeer natte bodems op lichte zandleem met ondiep veensubstraat
sPfg	Zeer natte bodems op lichte zandleem met humus en/of ijzer B horizon en ondiep zandsubstraat
v	Venige bodems

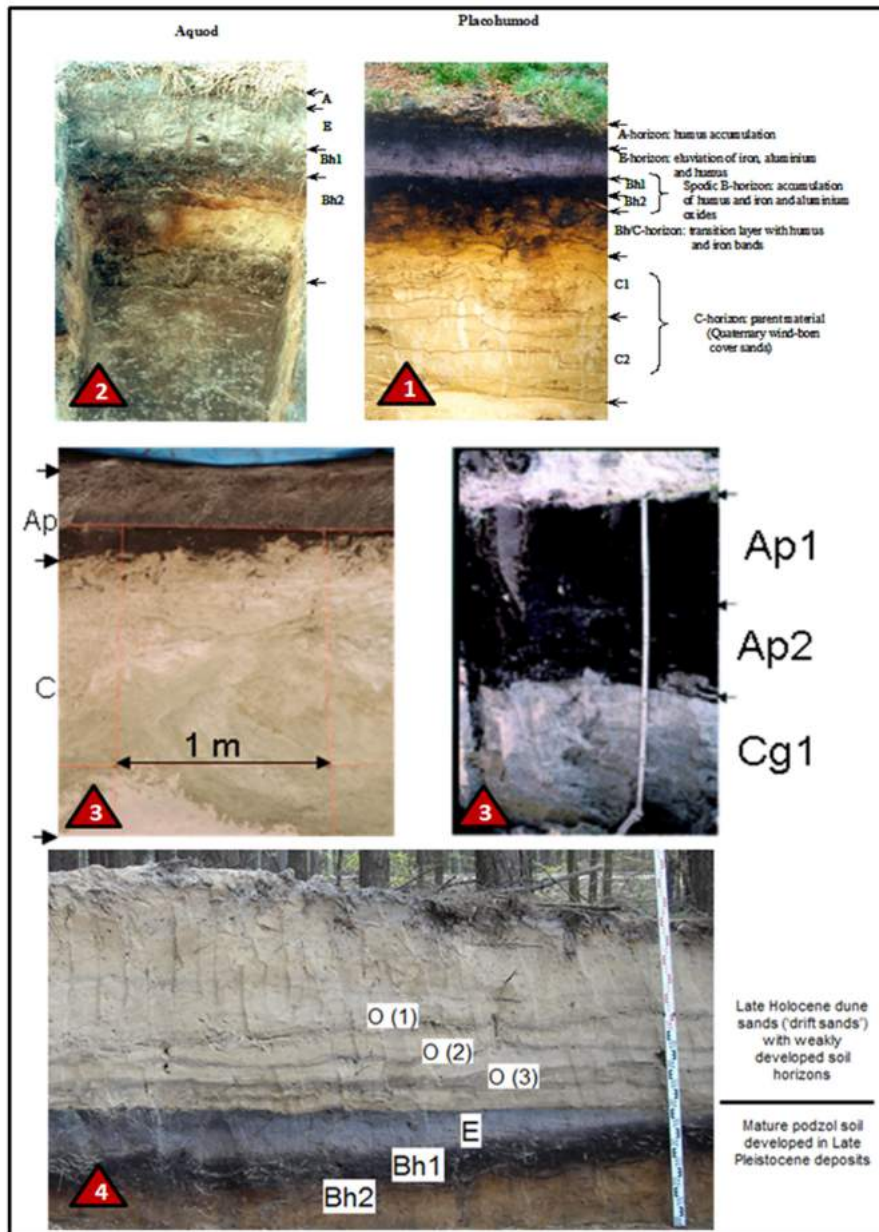
Duingrond is een zandig bodemtype zonder duidelijke bodemprofielontwikkeling. Deze bodems zijn het gefixeerde oppervlak van stuifzanden, gevormd tijdens de laatste honderden jaren. De andere bodems met profielontwikkeling zijn podzol-bodems die gevormd zijn in een substraat van dekzanden afgezet tijdens de laatste ijstijd. Ter hoogte van de site is dit type bodem begraven door recente stuifzanden [R4-9]. Ze zijn gekenmerkt door een duidelijke profielontwikkeling ten gevolge van uitspoeling en inloging van organisch materiaal en ijzeroxiden. De stuifzanden zijn, buiten de ontwikkeling van al dan niet begraven strooisellagen, niet aangetast door bodemvorming. Ten noorden van de site, ter hoogte van de alluviale vlakte van de Kleine Nete/Witte Nete, worden andere bodemtypes aangetroffen. De zandbodems domineren (Zbm, Zcm, Zdm, Zem) maar zijn gekenmerkt door een diepe antropogene humus-A horizont. Verder verandert de textuur soms naar lemig zand (S-textuur), en is er niet altijd een profiel-ontwikkeling aanwezig (p).



Figuur 4 - 16: Detail van de bodemkaart in de omgeving van de bergingssite. Z = textuur zand; b,c,d,e,f = drainageklassen van droog naar nat; g = profiel met humus-B horizont, m = profiel met antropogene A-horizont, p = geen profielontwikkeling; v = veesubstraat. De nummers verwijzen naar de locaties van de afgebeelde bodemprofielen in Figuur 4 - 17.

Van verschillende bodemprofielen (locaties aangeduid in Figuur 4 - 16 zijn voorbeelden weergegeven in Figuur 4 - 17. Het eerste bodemprofiel (locatie 1) is een typische podzol in relatief droge zandgrond (placohumod), met duidelijke profielontwikkeling en de vorming van horizonten A1 (humus-horizont), E (uitlogingshorizont), Bh1 (humus B horizont), Bh2 (ijzer B horizont), B/C (overgang tussen B en C) en C (moedermateriaal). Dit bodemtype is typisch voor droge zandgronden onder bos- en/of heidevegetatie. De vorming van deze bodem vergt enkele duizenden jaren [R4-13]. Het tweede bodemprofiel (locatie 2) toont dezelfde bodem, maar gevormd onder nattere omstandigheden (aquod). Het derde en vierde bodemprofiel (locatie 3) zijn twee antropogene bodems die ontstaan zijn door plaggencultuur. Tot de introductie van kunstmatige meststoffen in de 20<sup>ste</sup> eeuw gebruikte men afgestoken heide-zoden (plaggen) om het land te bemesten, nadat alle humusrijke gronden reeds afgestoken waren. Het vijfde bodemprofiel (locatie 4) toont een getrunceerde goed ontwikkelde droge podzolbodem die begraven is door de accumulatie van stuifzanden. Van dit bodemprofiel kunnen enkele natuurlijke en antropogene processen afgelezen worden die cruciaal zijn geweest in de recente vormingsgeschiedenis van het landschap: (1) bodemvorming onder bos en nadien eventueel heide tussen ongeveer 11 000 en 1 000 jaar geleden (podzol); (2) erosie en/of afsteken van bovenste humus-horizonten van deze podzol ongeveer 600 jaar geleden; (3) afwisselende periodes van landschapsinstabiliteit (duinvorming) en stabiele fasen tussen ongeveer 600 en 300 jaar geleden, ten gevolge van plaggencultuur, overbegrazing en mogelijk klimaatschommelingen; (4) finale fixatie van het duinoppervlak ongeveer 300 jaar geleden – de vorming van een micropodzol – dennenaanplant vanaf de 18-19<sup>de</sup> eeuw.

Enkele bodemeigenschappen van een reeks belangrijke bodems in de omgeving van de bergingssite zijn gegeven in Tabel 4 - 4. Op basis hiervan kunnen chemische, fysische en hydraulische parameters berekend worden, zoals de bulkdensiteit en de 'van Genuchten' parameters (zie ook Tabel 4 - 49). De bovenste horizonten (A1, Ap en A2 (E)) vertonen de grootste variabiliteit, zowel wat dikte, textuur en organisch koolstof betreft. Ook de accumulatiehorizonten Bh en Bi vertonen verschillen in dikte en gehalte aan organisch koolstof. De diepere horizonten B/C en C zijn zeer gelijkaardig voor de drie verschillende bodemtypes en zijn gekenmerkt door de quasi volledige afwezigheid van organisch koolstof.



Figuur 4 - 17: Bodemprofielen volgens nummering in Figuur 4 - 16. De bodemhorizonten zijn aangeduid met hun respectievelijke code. A: humus horizont, Ap: plaggen horizont, E: uitlogingshorizont, B: inspoelingshorizont (humus, ijzer- en aluminiumoxiden), Bh1: humus B-horizont, Bh2: ijzer B-horizont, Bh/C: overgangszone tussen B- en C-horizont, C: moedermateriaal, Cg1: moedermateriaal. (1): Typisch profiel voor een droge tot matig natte podzolbodem onder heide vegetatie (Zcg/Zdg) [R4-13]; (2) Natte podzolbodem onder heide vegetatie (Zeg) [R4-13]; (3): Humusrijke plaggenbodem ontwikkeld onder landbouwgrond (Zdm) [links R4-68]; rechts [R4-14]; (4): Chronosequentie met aan de top droge zandgronden (stuifzanden) met drie fossiele premature bodemhorizonten (O), en onderaan de uitlogings- en inspoelingshorizonten (E, Bh1 en Bh2) van een droge podzolbodem [R4-9].

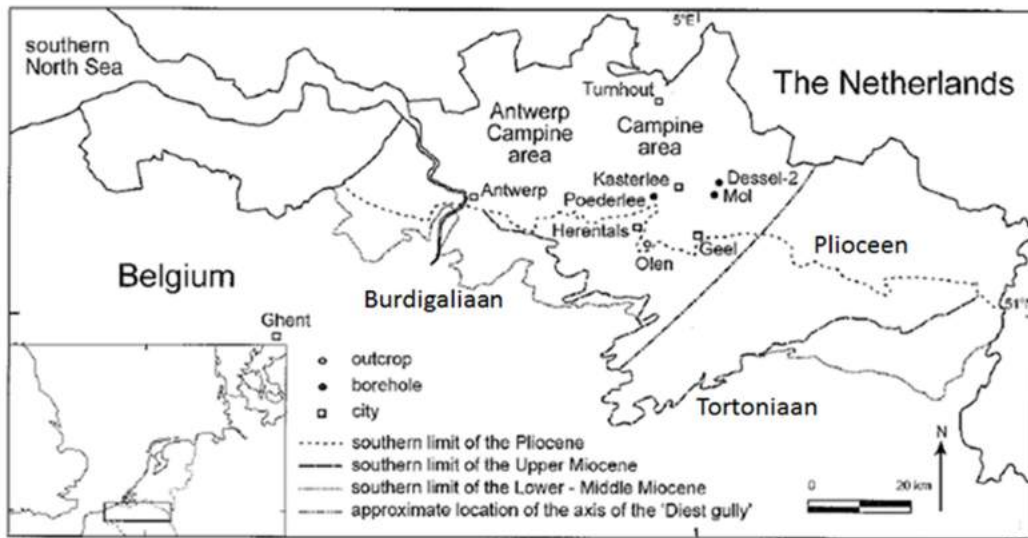
**Tabel 4 - 4: Bodemeigenschappen van verschillende horizonten bodemseries Zcg, Zdg en Zeg rondom de site (kaartblad 31W) op basis van [R4-15]. OC: organisch koolstof; Standaarddeviaties staan tussen haakjes.**

Bodemtype	Horizont	Dikte (cm)	Zand (%)	Silt (%)	Klei (%)	OC (%)
Zcg	A1	17 (12)	96 (2)	4 (2)	1 (0)	2,5 (0,1)
	A2 (E)	8 (2)	99 (0)	1 (0)	0 (0)	0,2 (0,0)
	Bh	6 (3)	97 (2)	3 (1)	1 (1)	2,7 (0,4)
	Bi	15 (5)	98 (1)	2 (1)	1 (1)	0,4 (0,1)
	BC	40 (10)	99 (0)	1 (0)	0 (0)	0,1 (0,0)
	C	35 (9)	98 (1)	2 (1)	0 (0)	0,0 (0,1)
Zdg	Ap	32 (10)	90 (6)	9 (5)	2 (1)	1,9 (0,6)
	A1	15 (5)	98 (0)	0 (0)	2 (0)	1,1 (0,0)
	A2 (E)	15 (5)	97 (0)	2 (0)	1 (0)	0,2 (0,0)
	Bh	12 (4)	96 (5)	3 (4)	1 (1)	1,2 (0,7)
	Bi	16 (6)	95 (5)	4 (4)	1 (1)	0,5 (0,3)
	BC	58 (22)	96 (5)	3 (4)	2 (2)	0,2 (0,1)
Zeg	C	37 (26)	96 (3)	3 (3)	1 (1)	0,0 (0,1)
	Ap	23 (5)	96 (3)	2 (1)	3 (2)	1,7 (0,9)
	Bh	4 (2)	94 (4)	5 (3)	2 (1)	2,2 (1,5)
	Bi	9 (6)	99 (2)	1 (1)	1 (1)	0,5 (0,1)
	BC	49 (18)	97 (2)	2 (2)	1 (1)	0,2 (0,1)
	C	75 (25)	99 (0)	0 (0)	1 (0)	0,1 (0,0)

#### 4.3.2.4 Paleogeografische evolutie

##### 4.3.2.4.1 Neogeen

Om het huidige landschap en toekomstige veranderingen te begrijpen dient de paleogeografische evolutie van de streek bekeken te worden vanaf 6 tot 7 miljoen jaar geleden (Tabel 4 - 5, Figuur 4 - 18 en Figuur 4 - 19). Op dat moment begon de Diestiaan-zee, die veel verder zuidwaarts dan het Hageland reikte, zich langzaam terug te trekken zodat de regio van de Kempen stilaan tot een kustnabije omgeving ging behoren. Er begonnen zich estuaria te ontwikkelen daar waar rivieren in zee uitmondden. Vermoedelijk was het estuarium van de Gete toen ter hoogte van Mol gelegen. De opeenvolgende afzettingen van de Formaties van Diest, Kasterlee en Mol zijn de geologische getuigen van deze langzame terugtrekking van de zee die wereldwijd veroorzaakt werd door een geleidelijke afkoeling van het klimaat.



Figuur 4 - 18: Schematische geologische kaart met de zuidelijke verbredingsgrenzen<sup>12</sup> van het Burdigaliaan (~ 20 tot 16 miljoen jaar), het Tortoniaan (~ 11 tot 7 miljoen jaar) en het Pliocéen (~ 6 tot 5 miljoen jaar geleden) [R4-16]. De bergingssite bevindt zich ter hoogte van boring Dessel-2.

#### 4.3.2.4.2 Pleistoceen

Consequent op dit post-Diestiaan emersie-vlak ontwikkelde zich een zuid-noord gericht rivierstelsel, dat ongeveer 2 miljoen jaar geleden al tot in de Noorderkempen was doorgedrongen, toen de kust ongeveer ter hoogte van Turnhout lag en daar de kleien van de Kempen afzette (Figuur 4 - 19). Van de periode tussen 2 en 1 miljoen jaar geleden zijn geen sedimenten bewaard gebleven in het Netebekken omdat ze nooit zijn afgezet of omdat ze achteraf verdwenen zijn door erosie. Ongeveer 1 miljoen jaar geleden dringt de Rijn helemaal door tot in de Kempen, aangetrokken door een fase van actieve breukwerking van (vermoedelijk) de breuk van Rauw<sup>13</sup>. De meest westelijke Rijnafzettingen zijn bewaard gebleven slechts enkele kilometer ten oosten van Mol, in Lommel (Figuur 4 - 20). Samen met de Rijn begon ook de Maas haar loop naar het westen te verleggen, zodat het confluëntiegebied van beide ter hoogte van het Kempisch Plateau was gelegen. Dit bleef zo tot ongeveer 700 000 jaar geleden.

<sup>12</sup> Begrenzing van voorkomen van een welbepaalde lithologische of stratigrafische eenheid

<sup>13</sup> De breuk van Rauw loopt ongeveer 7 km oostwaarts van de site (zie ook Figuur 4 - 42)

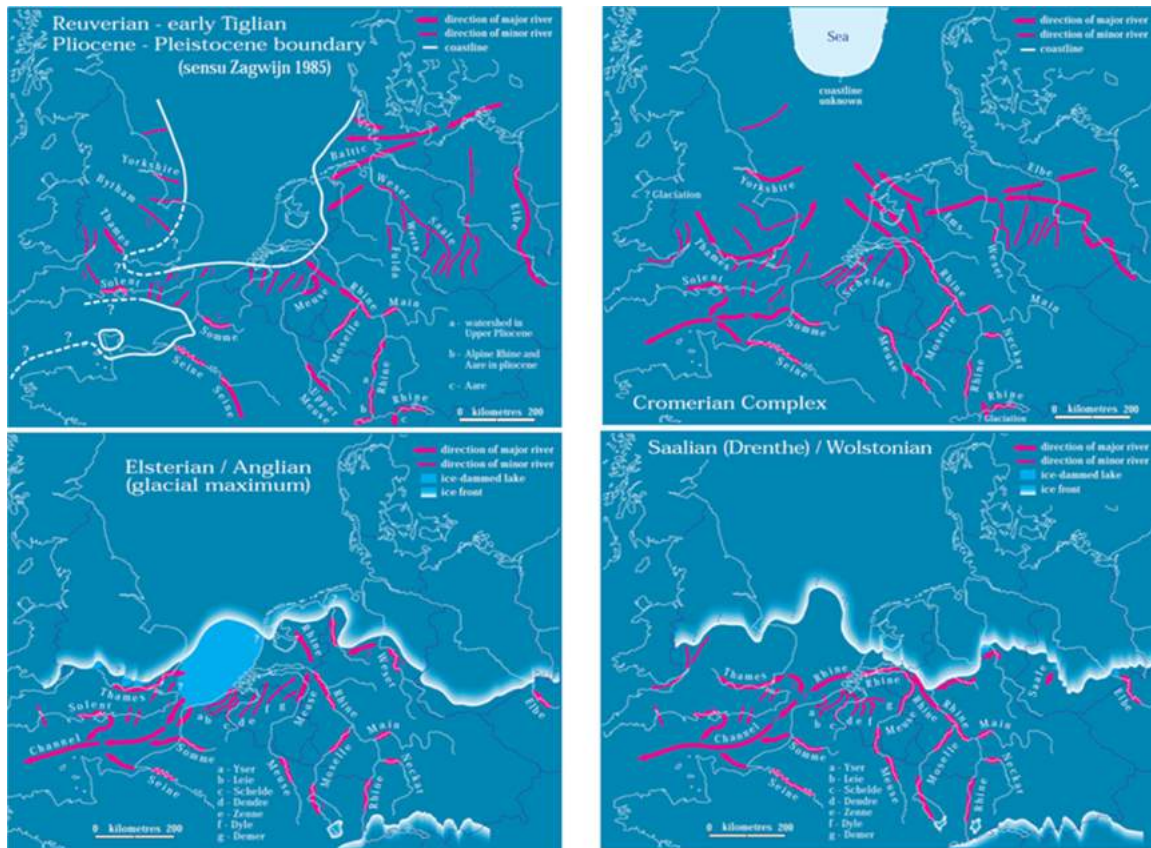
**Tabel 4 - 5: Chronostratigrafische tabel van het Quartair**

Systeem	Serie	Subserie	Super-etage (NW Europe)	Etage (NW Europe)	Sub-etage (NW Europe)	Chronozone	Begin (Ma, ka)	Einde (Ma, ka)				
Quartair	Holocene					Subatlanticum	2,4	0				
						Subboreaal	5,7	2,4				
						Atlanticum	9,2	5,7				
						Boreaal	10,5	9,2				
						Preboreaal	11,5	10,5				
	Pleistocene	Laat			Weichseliaan	Laat-glaciaal	Jonge Dryas	13	11,5			
							Allerød	14	13			
								15	14			
							Laat	30	15			
							Midden	59	30			
		Midden					Pleni-glaciaal	Vroeg	74	59		
									116	74		
								Vroeg	Eemiaan		0,13	0,12
										Saaliaan	0,39	0,13
										Holsteiniaan	0,42	0,39
										Elsteriaan	0,47	0,42
								Vroeg	Cromeriaan		0,78	0,47
										Baveliaan	0,88	0,78
										Menapeniaan		
										Waaliaan		
Eburoniaan												
Tigliaan	2,44	1,77										
Pretigliaan	2,58	2,44										

De vroegere aanwezigheid van Maas en Rijn is een cruciale mijlpaal in de evolutie van het Netebekken, omdat ze aangeeft dat in die tijd het reliëf omgekeerd was aan het huidige, namelijk een brede vallei ter hoogte van het Kempisch Plateau, met ten westen ervan vermoedelijk een opeenvolging van noord-zuid gerichte dalbodems en interfluvia. Er is geen reden om aan te nemen dat de erosiebasis van deze dalbodems lager zou zijn dan die van Maas en Rijn zodat gesteld kan worden dat de hoogte van de Rijnafzettingen in Lommel (~ 50 m) representatief is voor de topografische hoogte van de regio Mol-Dessel in die tijd. Aangezien de site om en bij +25 m TAW ligt, betekent dit dat 25 m sediment is verdwenen sinds de doortocht van Maas en Rijn in de Kempen [R4-5].

De geleidelijke afkoeling van het klimaat heeft zich in het Quartair (vanaf ~ 2,7 miljoen jaar geleden) nog versterkt. De eerste getuigen van periglaciaal omstandigheden, met bodemverstoring door intensieve vorstwerking, dateren al van bijna 2 miljoen jaar geleden. Vanaf min of meer 1 miljoen jaar geleden is er sprake van een uitgesproken afwisseling van zeer koude perioden (glacialen) en kortere warme perioden<sup>14</sup> (interglacialen) met een dominante frequentie van 100 000 jaar. Het is deze afwisseling van koude en warme perioden, samen met een verlaging van de erosiebasis (lage zeespiegelstanden en opheffing), die het huidige reliëf hebben gevormd.

<sup>14</sup> Periodes vergelijkbaar met het huidige klimaat.

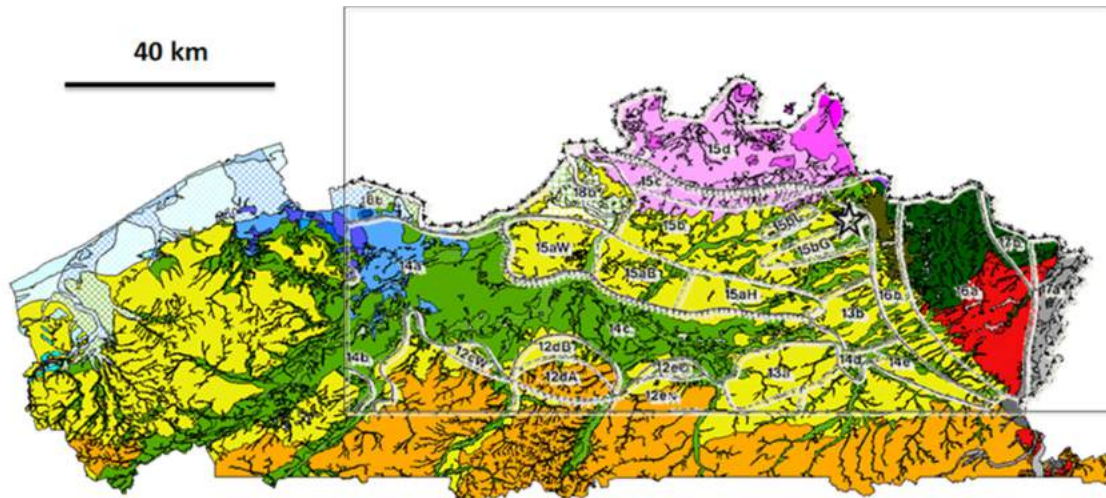


Figuur 4 - 19: Evolutie van het rivierennetwerk in NW Europa, van het begin van het Quartair tot het einde van de voorlaatste ijstijd (Saaliaan) [R4-17]. Op de Pliocéen-Pleistoceen grens bestaat in Vlaanderen een noord-zuid gericht dalstelsel dat na het Elsteriaan grondig gemodificeerd wordt door het doorbreken van de landengte tussen Engeland en Frankrijk ten gevolge van de plotse drainage van een proglaciaal meer. Dikke rode pijlen: stromingsrichting van hoofdrivieren, dunne rode pijlen: stromingsrichting van bijrivieren, dunne witte lijn: kustlijn, brede witte lijn: ijsfront.

Het consequent zuid-noord gerichte rivierpatroon sneed zich verder in, en ondervond zodoende meer de invloed van de onderliggende geologische lagen. Deze vormen een afwisseling van noordoost-zuidwest gerichte resistente en minder resistente sedimenten, wat een rivierpatroon met diezelfde richting bevoordeelt. De ontwikkeling van het Netebekken werd in het oosten afgeblokt door de resistente Maas- en Rijnafzettingen, en in het noorden door de resistente kleien van de Kempen. Stilaan begonnen de Kleine en Grote Nete zich te ontwikkelen in de richting die we nu kennen, en kon het uitschuren van het bekken in noordoost-zuidwestelijke richting volop beginnen. Er zijn aanwijzingen dat rivierinsnijding vooral plaatsvond op de overgang van glacialen naar interglacialen en omgekeerd, terwijl interfluvia en hellingen in belangrijke mate verweerden en



geërodeerd werden tijdens periglaciale<sup>15</sup> perioden met de ontwikkeling van permafrost<sup>16</sup> en de afwezigheid van betekenisvolle vegetatie. Cryopedimentatie<sup>17</sup> ten gevolge van run-off door plotse sneeuwmelt op een bevroren oppervlak zonder vegetatie was verantwoordelijk voor de vorming van een aantal pedimenten<sup>18</sup> op verschillende topografische niveaus. Eén daarvan is het glacis van Beringen-Diepenbeek waarmee het interfluvium van de toekomstige site aansluit. Dit glacis zou tijdens het Saaliaan gevormd zijn.



**Figuur 4 - 20:** Quartairegeologische kaart van Vlaanderen met de geomorfologische entiteiten uit Figuur 4 - 8. De purper kleur duidt op de aanwezigheid van een ondiep klei-substraat aan (kleien van de Kempen). Het Kempisch Plateau is rood en donkergroen gekleurd met de aanwezigheid van respectievelijk Maas- en Rijnafzettingen. Blauw verwijst naar het voorkomen van bedekte getijdenafzettingen en groen naar al dan niet bedekte fluviale afzettingen. Arceringen duiden op het voorkomen van recente getijdenafzettingen. Geel en oranje zijn respectievelijk de dekzand- en loess<sup>19</sup>-gordel.

Lange tijd lag de west-oost gerichte kustlijn ten noorden van de Kempen, en draineerden ook de Schelde en haar toekomstige bijrivieren in noordelijke richting (Chromeriaan in Figuur 4 - 19). Waarschijnlijk rond 420 000 jaar geleden kwam hierin verandering, toen de landengte tussen Calais en Dover door een catastrofale gebeurtenis verdween, en het Kanaal terug geopend werd. Hiervoor wordt de plotse drainage van een proglaciaal meer

<sup>15</sup> Periglaciale omstandigheden komen voor in streken die binnen de onrechtstreekse invloedssfeer van een ijskap liggen, zoals in onze streken het geval was tijdens ijstijden. Deze omstandigheden kenmerken zich door processen en verschijnselen die gedomineerd worden door vorst- en ijswerking zoals vorstscheuren in de bodem, het ontstaan van een permanent bevroren ondergrond enz.

<sup>16</sup> Permanent bevroren ondergrond waarvan slechts het bovenste gedeelte (tot enkele meters diep) ontdooit in de zomer.

<sup>17</sup> Proces waarbij een pediment gevormd wordt ten gevolge van oppervlakkige erosieprocessen in koude omstandigheden.

<sup>18</sup> Licht hellende erosievlakte die meestal ontstaat door fluviale erosie aan de voet van een steilere helling. Indien deze processen zich voordoen in koude (periglaciale) omstandigheden, meestal met permafrost, spreekt men van een glacis.

<sup>19</sup> Loess is een eolische afzetting dat in hoofdzaak uit de silt-fractie (20 – 50 µm) bestaat, bestaande uit kwarts en in mindere mate uit kleien en carbonaat.

tijdens het Elsteriaan verantwoordelijk geacht (Elsteriaan/Angliaan in Figuur 4 - 19). Deze gebeurtenis, die zich ongeveer 150 000 jaar geleden nogmaals herhaalde, had een determinerende invloed op de ontwikkeling van het Scheldebekken, inclusief het Netebekken [R4-5]. Vooreerst zorgde dit voor een versterking van de oost-west component in het riviernet, en ten tweede zorgde dit voor een plotse en drastische verlaging van de erosiebasis voor het Scheldebekken, en dus ook het Netebekken dat zich hierbij aangesloten had. De uitschuring van het Kanaal had immers tot gevolg dat grote rivieren zoals de Thames, Rijn en Maas tijdens lage zeespiegelstanden in zuidelijke richting draineerden, doorheen het Kanaal richting Atlantische Oceaan. Dit had tot gevolg dat het Scheldebekken van daaruit, via de kortste weg aangetapt werd via terugschrijdende erosie. Vanaf dit moment kon het uitschuren van de Vlaamse Vallei, een nu begraven dalsysteem, een aanvang nemen. Terugschrijdende erosie vanuit de Vlaamse Vallei heeft in aanzienlijke mate bijgedragen tot de uitschuring van het Netebekken. Er zijn aanwijzingen dat dit proces zich in de toekomst, bij een hernieuwde zeespiegeldaling, zal verderzetten net zolang tot een evenwichtssituatie is bereikt met de reële erosiebasis voor het Scheldebekken, namelijk de bodem van de Noordzee.

Tussen het einde van de voorlaatste ijstijd (Saale, ~ 130 000 jaar geleden), en het begin van het Pleni-Weichsel, (~ 75 000 jaar geleden), vond opnieuw een belangrijke insnijdingsfase plaats in het Netebekken. Deze is gedocumenteerd door een fossiele geul, tot 10 m diep onder het huidige maaiveld, ter hoogte van de Grote Nete in Westerlo. Deze insnijdingsfase heeft een intense versnijding van de vroegere gevormde pedimenten veroorzaakt, zoals het glaciaal van Beringen-Diepenbeek. Rond die periode stroomde de Grote Nete op dat punt rechtdoor richting Demer-Dijle, wat volledig verhinderd werd toen de fossiele geul helemaal terug opgevuld was tegen het einde van het Pleni-Weichsel (van 30 000 tot 14 000 jaar geleden). Een verdroging van het klimaat zorgde enerzijds voor minimale fluviale activiteit zodat sedimenten in de dalbodem niet meer vervoerd werden, en anderzijds voor de aanvoer van eolisch zand waardoor de valleien finaal dichtwaaiden. In combinatie met het aansnijden van de relatief resistente Boomse Klei, waardoor insnijding steeds moeilijker werd, zijn deze factoren de oorzaak voor de plotse verandering van stroomrichting van de Grote Nete nabij Westerlo (Figuur 4 - 8). Rond die tijd gebeurt ongeveer hetzelfde in de Vlaamse Vallei nabij Gent, waardoor de Schelde niet langer via die weg kon afvloeien, en zich een weg moest banen doorheen de cuesta van de Boomse Klei om voortaan via Antwerpen en de Westerschelde in de Noordzee te stromen.

De verdroging van het klimaat en de continue toevoer van eolisch materiaal uit glaciaal puin in Noord-Europa zorgden ervoor dat het landschap tegen het begin van het Laat-Weichsel (~ 14 000 jaar geleden) helemaal bedekt was met een 1 à 2 m dik eolisch zanddek. Tijdens koudere perioden in het Laat-Weichsel, en later in het Holoceen (~ 11 500 jaar geleden tot nu) werd dit zanddek verder verstoven tot landduinen en stuifduinen.

#### 4.3.2.4.3 Holoceen

Tijdens de overgang naar het huidige interglaciaal, het Holoceen, vindt opnieuw rivierinsnijding en nadien opvulling plaats. De Laat-Weichsel en Holocene evolutie van de Kleine Nete is gekenmerkt door twee erosiefasen, namelijk juist voor en na de Allerød-oscillatie (14 000 tot ongeveer 13 000 jaar geleden). Vanaf het Preboreaal stabiliseert de Kleine Nete zich. In het samenvloeiingsgebied van de Grote Nete, Demer en Dijle zijn verschillende insnijdingsfasen geobserveerd. Op het einde van het Laat-Weichsel vormen zich grote ingesneden meanders in de toen bestaande riviervlakte. In afgesneden meanders vindt later veengroei plaats terwijl in het Boreaal beddingserosie optreedt. Tijdens het Atlanticum en Subboreaal bouwt de riviervlakte zich verder op,

maar op het einde van het Subboreaal treedt er opnieuw beddingserosie op. Het Subatlanticum tenslotte is gekenmerkt door sedimentatie en stroomverplaatsingen.

Het Holoceen is voor het Netebekken een periode die gekenmerkt wordt door intense bodemvorming onder het nieuw gevormde loofbos na het einde van de laatste ijstijd. De getuigen van deze fase zijn duidelijk zichtbaar op bodemkaarten en in bodemprofielen als podzol-bodems. Ze hebben in belangrijke mate bijgedragen tot de stabilisering van het post-glaciale landschap in de zandige Kempen. De mens heeft tijdens het Holoceen in toenemende mate een invloed gehad op de landschapsvorming. Met de ontbossingen die een start namen vanaf het Subatlanticum zijn heide en grassen zich gaan ontwikkelen waardoor het podzolisatie-proces vertraagd werd en hier en daar meer sediment in de rivieren terecht kwam (§6.2.1.4 in [OD-065]). Vanaf de Middeleeuwen is met de introductie van de plaggencultuur, verdere ontbossingen en overbegrazing, de stabiliteit van het landschap drastisch afgenomen, wat geleid heeft tot intensieve winderosie en de vorming van stuifduinen, mogelijk in combinatie met veranderde klimatologische en hydrologische omstandigheden. Vanaf de 18<sup>de</sup> eeuw is het landschap stilaan opnieuw gestabiliseerd door lokale en sporadische dennenaanplant.

Menselijke ingrepen in het landschap hebben de hydrologie van de streek sterk beïnvloed (§2.3 in [R4-220]). Een eeuw geleden bestond de vallei van de Kleine Nete tussen Geel en Herentals uit een hooilandachtige, moerasachtige vlakte. Waar turf en ijzersteen gedolven werden, ontstonden rechthoekige plassen, die men liet verlanden. Rond 1865 was de Kleine Nete nog een sterk meanderende rivier, zonder kunstmatige dijken. Verkavelingen, het uitbreiden van weilanden ten koste van moerassige vlaktes, het aanleggen van een grachtensysteem en het rechtekken en bedijken van beken en rivieren in de loop van de 20<sup>ste</sup> eeuw heeft voor een verdroging van het landschap in de valleien gezorgd. In het kader van natuur- en waterbeheer zijn recent maatregelen genomen die de oude patronen terug zouden herstellen.

#### 4.3.2.4.4 Conclusie

Op een tijdschaal die de afwisseling van meerdere glacialen en interglacialen overspant zijn grondige veranderingen waar te nemen in het Netebekken. Verschillende insnijdings- en opvullingsfasen hebben het landschap grotendeels vormgegeven. Het interfluvium tussen de Kleine Nete/Witte Nete en de Breiloop, waar de geplande site voor oppervlaktebergingsinrichting gelegen is, is geomorfologisch gezien al 10 000 jaar stabiel, en mogelijk al veel langer. In de beschouwde tijdspanne kunnen epeirogenetische bewegingen<sup>20</sup> als gering worden beschouwd. Belangrijke rivierinsnijding heeft enkel plaatsgevonden ten noorden en ten zuiden van het interfluvium en dateert vermoedelijk al van het begin van het Weichseliaan (ca. 75 000 jaar geleden). In het huidige klimaat is de erodeerbaarheid van het interfluvium zeer klein en de geomorfologische stabiliteit groot ten gevolge van de bodemcohesie (vegetatie, podzolisatie, ondiep grondwater). In het huidige of een vergelijkbaar klimaat kan enkel menselijk ingrijpen determinerend zijn voor een verhoogde erodeerbaarheid van de regio: het verstoren van vegetatie en bodemcohesie kan winderosie bevorderen en de migratie van stuifzanden veroorzaken.

---

<sup>20</sup> Vorming van bekkens en opwelvingen

### 4.3.3 Menselijke geografie (demografie en menselijke activiteiten)

#### 4.3.3.1 Infrastructuren en menselijke activiteit

##### 4.3.3.1.1 Industriële activiteit

De belangrijkste industriële activiteiten in het noordoostelijke deel van België kunnen worden onderverdeeld in twee sectoren: de chemische en petrochemische industrie (Antwerpen, Tessenderlo en Turnhout) en de metaalindustrie (Antwerpen, Olen, Geel, Balen).

Binnen een straal van 5 km rond de bergingssite is echter vooral nucleaire industrie aanwezig (Figuur 4 - 21):

- ten noordoosten van de bergingssite, de installaties voor behandeling, conditionering en opslag van radioactief afval, door Belgoprocess geëxploiteerd;
- Belgonucleaire, gelegen ten noorden van de bergingsinstallatie. Dit bedrijf produceerde U en Pu mengoxide-brandstof (MOX) voor kerncentrales gedurende 20 jaar, maar deze activiteit werd beëindigd in 2006. De installatie is nu in een ontmantelingsfase die zal lopen over meerdere jaren;
- FBFC International (*Franco-Belge de Fabrication de Combustible*): bedrijf dat instond voor de productie van brandstof voor kerncentrales gebaseerd op verrijkt uranium (UO<sub>2</sub>) of heropgewerkt uranium (REPU), en voor de montage van de splijstfoelementen op basis van U en Pu. Het is op ongeveer 1 km ten noordwesten van de bergingssite gelegen. In het voorjaar van 2015 werden de laatste bedrijfsactiviteiten stopgezet, het laatste brandstofelement werd op 23 april gefabriceerd. Het einde van de ontmanteling en sanering is voorzien voor midden 2019.
- IRMM: Instituut voor referentiematerialen en metingen (EURATOM), gelegen op 4 km zuidwesten van de bergingssite;
- SCK • CEN, het Studiecentrum voor Kernenergie, gelegen ten zuiden van de bergingssite;
- VITO, de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, gelegen op dezelfde site als het SCK • CEN;
- de sinds 2014 ontmantelde en gesloopte kolengestookte elektriciteitscentrale van Electrabel. Grenzend hieraan zijn de terreinen van de vroegere Balmatt-fabriek die door VITO gesaneerd worden. Het geheel van terreinen waarop de elektriciteitscentrale en de Balmatt-fabriek stonden, wordt de Balmatt-site genoemd. Op deze site voert VITO een geothermisch project uit (gestart tijdens de zomer van 2015);
- een industrieel gebied in uitbreiding met voornamelijk kleine en middelgrote ondernemingen (kmo's) ligt op ongeveer 1 km ten noorden van de bergingssite, en;
- een industrieel gebied in uitbreiding ligt vlak bij de spoorlijn Antwerpen - Neerpelt op ongeveer 4 km ten zuidoosten van de bergingssite.
- Zandontginning door Sibelco

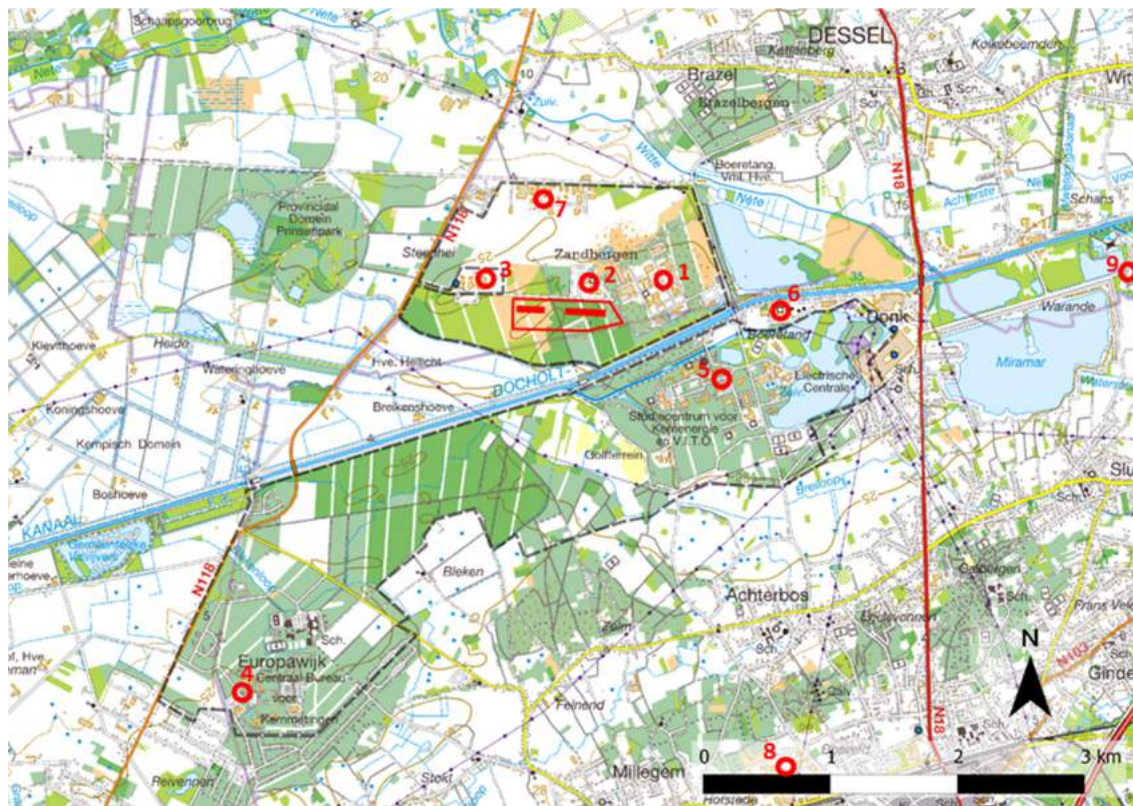
Sibelco wint en veredelt diverse soorten zand, hoogwaardige kwartszanden voor de industrie, en mineralen. Het bedrijf gevestigd in Dessel beschikt over 2 zandgroeven in de buurt (Donk en Pinken) en voert ook zand aan uit Lommel. Partikels groter dan 1 mm worden niet gebruikt in het productieproces en afgevoerd. Het resterende zand wordt verdeeld over drie fracties (i.e. fijn, midden en grof).

Een deel van het zand wordt verhit tot 500 °C en verwerkt tot cristobaliet<sup>21</sup>. De fijnere fractie wordt vermalen tot kwartsmeel.

Volgens de laatste berekeningen zou er nog 30 tot 50 jaar worden ontgonnen vooraleer al het lokale zand zou gewonnen zijn.

Het bedrijf verwerkt ongeveer 2000 containers per jaar, waarbij de vrachtwagens worden geladen met een snelheid van 30 ton per minuut. Om aan de wettelijke bepalingen betreffende inhalatie van fijn stof te voldoen, worden de luchtconcentraties tijdens het productieproces regelmatig gemeten. Het directe contact van de transporteur met het zand is gelimiteerd en beperkt zich tot het afdekken van het zand met een zeil.

Op verdere afstand, ongeveer 6,5 km ten zuidoosten van de site, bevindt zich het bedrijf AGC Flat Glass Europe. Wegens de aanzienlijke hoeveelheid van opgeslagen waterstoffluoride (zeer giftig) valt het bedrijf onder de Seveso wetgeving.



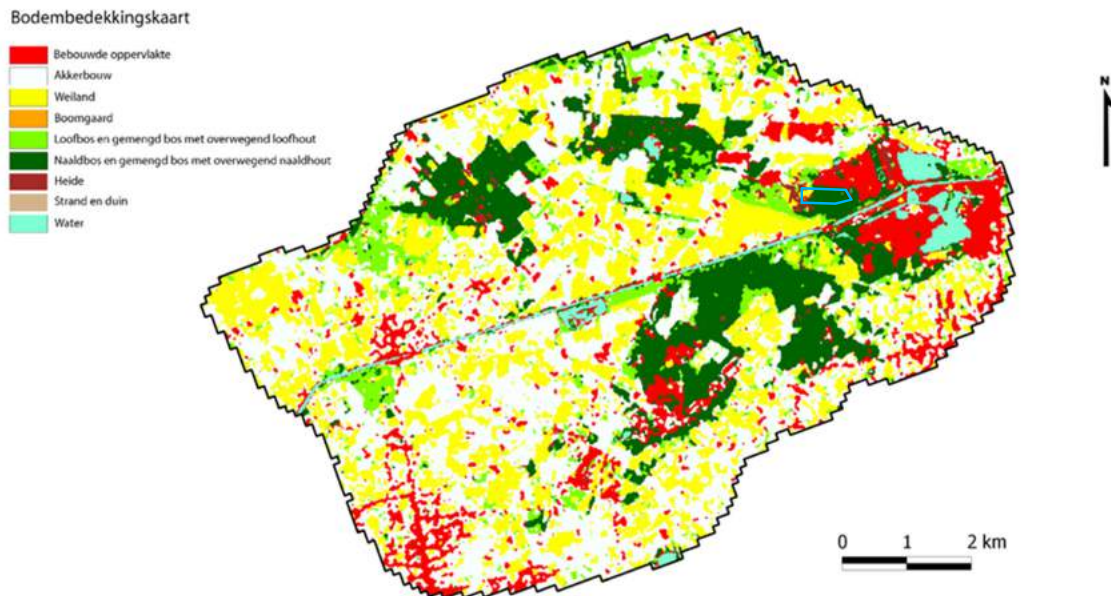
Figuur 4 - 21: Topografische kaart van de omgeving van de bergingssite (rode vijfhoek). Industriële activiteiten: (1) Belgoprocess; (2) Belgonucleaire (activiteiten gestopt) ; (3) FBFC International (activiteiten gestopt); (4) IRMM; (5) SCK • CEN en VITO; (6) Balmatt site (geothermie); (7) Industrieel gebied I ; (8) Industrieel gebied II en (9) Sibelco.

<sup>21</sup> Toepassingen vooral voor kunststofs gebonden bouwmaterialen, composiet steen, en coatings

#### 4.3.3.1.2 Agrarische activiteiten

Talrijke agrarische gebieden liggen dicht bij de bergingssite. De landbouwbedrijven zijn verspreid over de hele regio. In de onmiddellijke nabijheid van de bergingssite concentreren de meeste activiteiten op de landbouwbedrijven zich op veeteelt (melkproductie).

In de regio wordt intensief aan landbouw gedaan waarbij ook veel bemest wordt. Melkvee, en af en toe schapen, worden gehouden op de weilanden. In de regio worden ook rundvee en varkens op stal gehouden (zie 'Veeteelt' in §4.3.3.1.2 en Tabel 4 - 12). De weilanden worden afgewisseld met de teelt van maïs, één van de meest voorkomende landbouwgewassen. Deze maïs wordt gebruikt als veevoeder tijdens de winterperiode (veestapel). Er zijn bijna geen kruidachtige soorten aanwezig (bijvoorbeeld enkel monocultuur van grassen). Figuur 4 - 22 toont aan dat de belangrijkste klassen van landgebruik voor de streek akkerland en weiland zijn.



**Figuur 4 - 22: Landgebruik in het gebied van het lokaal hydrogeologisch model (data uit GIS Vlaanderen, 2001). Bergingssite in blauwe lijn.**

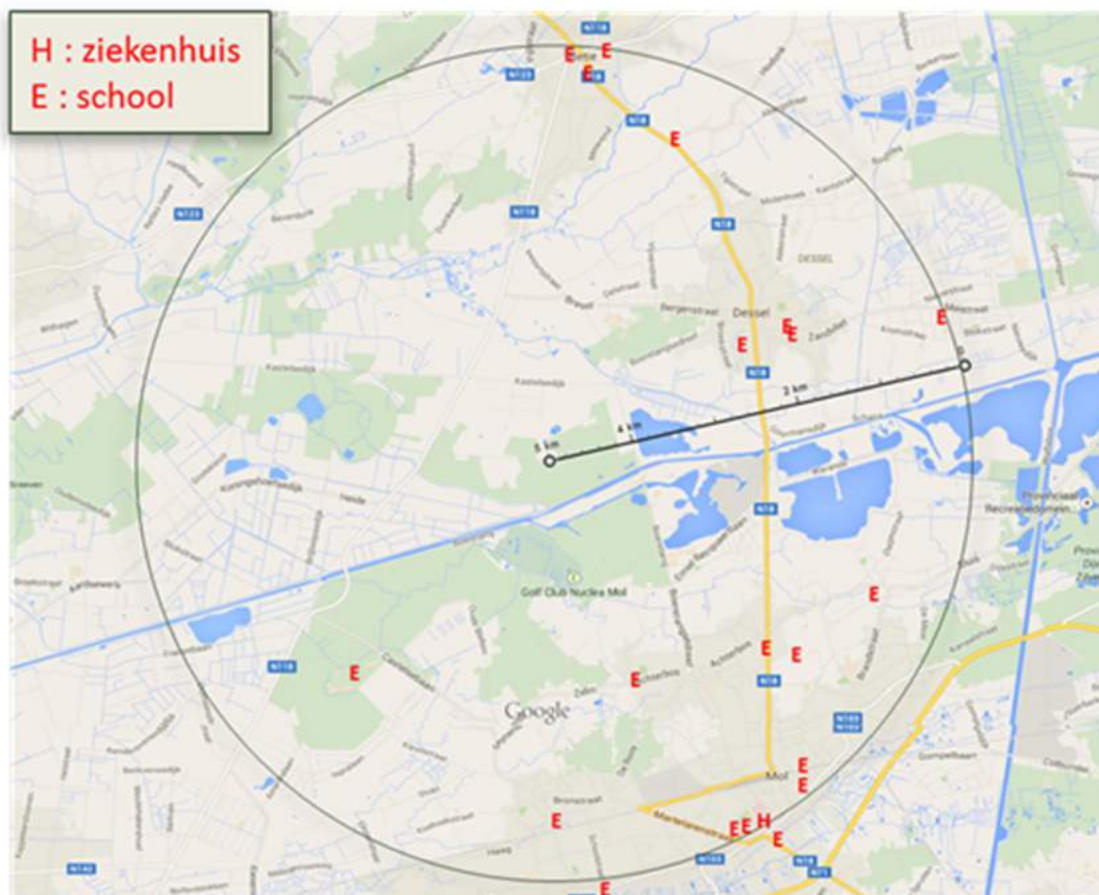
#### 4.3.3.1.3 De Dienstensector

##### Scholen

De aanwezige scholen en ziekenhuizen in een straal van 5 km rondom de bergingssite zijn in Figuur 4 - 23 weergegeven.

Dessel heeft vier basisscholen met ongeveer 300 kleuters en 550 kinderen die lagere school volgen.

Mol telt een groot aantal scholen: 5 gemeentelijke basisscholen, 2 scholen voor bijzonder onderwijs, een academie voor beeldende kunsten, een academie voor muziek en woord, verschillende scholen van het gemeenschapsonderwijs en vrije scholen, een Europese school en een school voor volwassenenonderwijs en avondonderwijs.



Figuur 4 - 23: Overzicht van de scholen en ziekenhuizen in een gebied dat binnen een straal van 5 km valt rondom de bergingssite.

Net als Dessel is Retie een kleine gemeenschap die 4 kleuterscholen en 3 basisscholen telt. Geel biedt eveneens een grote variatie aan scholen en telt drie scholen voor basisonderwijs, twee scholen voor bijzonder onderwijs, twee scholen voor deeltijds kunstonderrwijs, twee scholen voor middelbaar onderwijs, een school voor hoger onderwijs, en vier scholen voor volwassenenonderwijs.

### Ziekenhuizen

Zowel Geel als Mol hebben een ziekenhuis. A.Z. St. – Dimpna, gelegen in het centrum van Geel, is een algemeen ziekenhuis met 295 bedden. Ongeveer 900 personeelsleden en 100 arts-specialisten zijn momenteel werkzaam in dit ziekenhuis dat volgende medische diensten aanbiedt: chirurgie, behandeling van inwendige ziekten, pediatrie, een kraamafdeling en een geriatrische afdeling.

Het Heilig Hart Ziekenhuis in Mol is een ziekenhuis met 183 bedden. Ongeveer 450 personen en 80 arts-specialisten werken in dit ziekenhuis. Het ziekenhuis biedt dezelfde medische diensten aan als het A.Z. St. – Dimpna in Geel.

### Toeristische activiteit

Het regionaal landschap Kleine en Grote Nete, waarvan Dessel en de omliggende gemeenten Mol, Retie en Balen deel uitmaken, vormen de toeristische trekpleister 'Kempense Meren'. De belangrijkste toeristische activiteit van de gemeente Dessel is ongeveer 290 ha recreatief bos dat gebruikt kan worden voor wandelen en fietsen.

Mol is een uitgestrekte gemeente en telt buiten het centrum van Mol 11 gehuchten<sup>22</sup>. De belangrijkste toeristische attracties zijn het provinciaal domein Zilvermeer, het recreatiepark Zilverstrand en Sunparks Kempense Meren, het Jakob Smits Museum, de Abdij van Postel en de dierenmarkt.

De best gekende toeristische attracties van Retie zijn het Prinsenspark, de lindeboom, de Sint-Pieters kapel, de watermolen, de pastorie, het retabel van Sint-Job en de windmolen 'de Heerser'.

Balen is het best gekend om zijn authentieke watermolens, de Olmense Zoo en het recreatiedomein Keiheuvel.

De stad Geel heeft ook een aantal interessante monumenten, musea en toeristische sites. De belangrijkste monumenten zijn de Britse militaire begraafplaats, de begraafplaats van baron Coppens, de Groenenheuvel kapel en enkele molens en kerken. Ook het Bakkerijmuseum, het Gasthuismuseum St.-Dimpna, het Klokkenmuseum en het Lampenmuseum zijn musea die regelmatig bezocht worden door toeristen. Dit leidt tot het verblijf van toeristen in hotels of ander logement (Tabel 4 - 6; [R4-19]).

Ook in Kasterlee zijn er tal van bezienswaardigheden zoals het attractiepark Bobbejaanland en het domein De Putten.

**Tabel 4 - 6: Aankomsten en verblijfsnachten in hotelaccommodatie in Dessel, Mol, Retie en Geel (cijfers 2014).**

	Dessel	Mol	Geel	Retie	Kasterlee
Aankomsten	2562	141799	19446	9012	68685
Belgen	71,9%	49,5%	74,7%	79,0%	80,3%
Buitenlanders	28,1%	50,5%	25,3%	21,0%	19,7%
Verblijfsnachten	12265	618170	58548	23232	182292
Belgen	80,0%	48,1%	80,9%	81,6%	72,4%
Buitenlanders	20,0%	51,9%	19,1%	18,4%	27,6%

<sup>22</sup> Achterbos, Donk, Ezaart, Ginderbuiten, Gompel, Heidehuizen, Millegem, Rauw, Sluis, Wezel en het uitgebreide en dunbevolkte Postel



#### 4.3.3.1.4 Landgebruik

##### Algemene gegevens

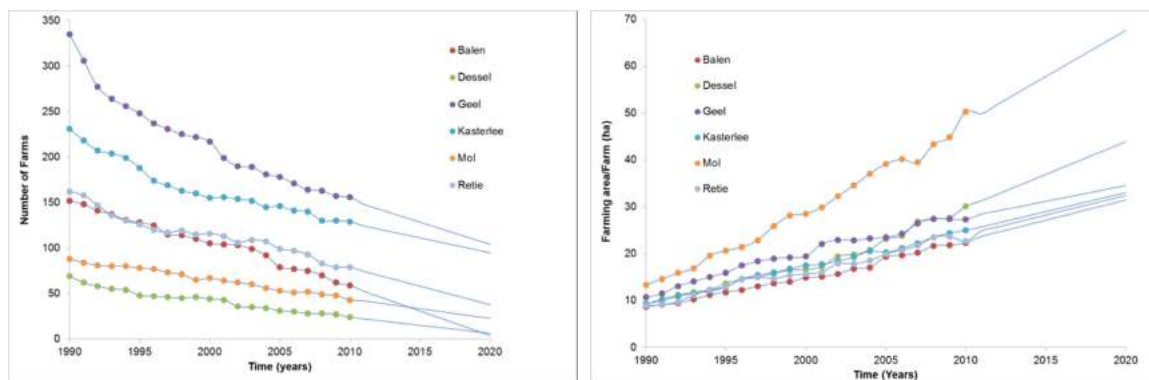
Dessel is een relatief kleine gemeente (27 km<sup>2</sup>), in tegenstelling tot haar buurgemeenten Mol (114,3 km<sup>2</sup>), Geel (109,9 km<sup>2</sup>), Balen (72,9 km<sup>2</sup>), Kasterlee (71,5 km<sup>2</sup>) en Retie (48,4 km<sup>2</sup>). Gegevens over het landbouwgebruik zijn opgesomd in Tabel 4 - 7 [R4-20]. Landbouw speelt een prominente rol in de omgeving van de bergingsite.

Tabel 4 - 7: Landgebruikgegevens (km<sup>2</sup>) voor Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen (cijfers op 01/01/2015).

	Dessel	Mol	Retie	Geel	Balen	Kasterlee
<b>Landbouwgrond</b>	11,4 (45 %)	32,6 (29 %)	30,9 (64 %)	65,6 (60 %)	39,5 (54 %)	35,0 (49 %)
<b>Bossen en beboste gronden</b>	5,2 (19 %)	32,3 (28 %)	5,3 (11 %)	6,2 (6 %)	8,1 (11 %)	15,1 (21 %)
<b>Bebouwde oppervlakte</b>	6,7 (25 %)	29,4 (26 %)	9,0 (19 %)	28,8 (26 %)	19,3 (26 %)	15,3 (21 %)
Wonen	3,7	12,4	5,2	14,0	10,8	8,9
Industriële	1,3	1,7	0,2	3,4	1,5	0,5
Handel	0,1	0,6	0,1	0,7	0,5	0,3
Quartaire sector	0,1	2,1	0,1	1,7	0,3	0,4
Recreatie	0,1	2,5	0,5	0,6	1,1	1,6
<b>Andere (woeste gronden, wateren, ...)</b>	3,8(14 %)	20,0 (18 %)	3,1 (6 %)	9,3 (8 %)	5,9 (8 %)	6,2 (9 %)
	27,0	114,3	48,4	109,9	72,9	71,5

Op basis van de gegevens van het Nationaal Instituut voor Statistiek werd de landbouwsector van de hierboven vermelde gemeenten bekeken. Figuur 4 - 24 illustreert de evolutie van de landbouwactiviteiten in het gebied. Er is een duidelijke afname in het aantal landbouwbedrijven, maar een toename van de bewerkte oppervlakte per bedrijf.

Ook het landgebruik en het vee van de verschillende landbouwbedrijven werd geanalyseerd. Tabel 4 - 8 illustreert dat in de omgeving van de bergingsite ongeveer 80% van de landbouwgrond wordt gebruikt voor de teelt van gewassen.



Figuur 4 - 24: Evolutie van de landbouwactiviteiten in het gebied. De linker grafiek illustreert de evolutie van het aantal landbouwbedrijven. De rechter grafiek illustreert het aantal ha grond dat per bedrijf gebruikt wordt.

**Tabel 4 - 8: Aantal bedrijven en oppervlakte landbouwgrond (are) voor akkerland, vaste planten, weiland en serres voor Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen (bron: NIS, 2010). n.a. : geen beschikbare gegevens.**

	Aantal bedrijven	Oppervlakte landbouwgrond (are)	Akkerland	Vaste planten	weiland	Serres
<b>Balen</b>	59	131 562	76%	0,17%	24%	0,004%
<b>Dessel</b>	24	72 178	86%	n.a.	14%	n.a.
<b>Geel</b>	156	425 906	80%	0,22%	20%	0,10%
<b>Kasterlee</b>	129	322 171	91%	0,37%	8%	0,12%
<b>Mol</b>	43	216 149	83%	7,66%	9%	0,03%
<b>Retie</b>	79	178 889	80%	3,28%	17%	0,11%

### Akkerbouw

Het merendeel van de gewassen geteeld op akkerland zijn granen (gemiddeld ongeveer 24%) en voedergewassen (ongeveer 62%). Een klein percentage wordt gebruikt voor de teelt van industriële opbrengstgewassen, knollen, peulvruchten, groenten en sierteelt. 0,23% van het akkerland wordt braak gelaten (Tabel 4 - 9).

**Tabel 4 - 9: Landgebruik in are voor verschillende gewastypes voor Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen (bron NIS, 2010). n.a. : geen beschikbare gegevens.**

	Akkerland, (are)	Graan	Nijverheids gewassen	Aardappelen	Peulvruchten	Voedergewassen	Groenten	Sierteelt	Braakland
<b>Balen</b>	99487	48%	1,1%	2%	0.4%	48%	0,2%	0,002%	0,1%
<b>Dessel</b>	61889	29%	n.a.	3%	n.a.	67%	0,8%	n.a.	n.a.
<b>Geel</b>	339190	14%	0,6%	8%	n.a.	76%	0,3%	n.a.	0,4%
<b>Kasterlee</b>	294301	16%	n.a.	18%	n.a.	64%	1,1%	0,03%	0,1%
<b>Mol</b>	180256	16%	6%	31%	1.0%	43%	3,3%	n.a.	n.a.
<b>Retie</b>	142233	18%	n.a.	10%	n.a.	71%	0,9%	0,1%	0,3%

### Tuinbouw

Ongeveer 2,34% van de landbouwgrond wordt gebruikt voor de teelt van vaste planten. In Balen en Kasterlee wordt de totaliteit van deze grond gebruikt door boomkwekerijen, terwijl in andere gemeenten het ook gebruikt wordt voor boomgaarden en soms voor de teelt van zacht fruit (Tabel 4 - 10 &

Tabel 4 - 11). Ongeveer 0,07% van de landbouwgrond wordt gebruikt voor kweekserres en 15% voor weiland. Hierover zijn echter slechts in beperkte mate gegevens beschikbaar.

**Tabel 4 - 10: Gebruik van teelt vaste planten en weiland, uitgedrukt in are, voor Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen (bron: NIS, 2010). n.a. : geen beschikbare gegevens.**

	oppervlakte (are) voor vaste planten	Boomkwekerij	Boomgaarden	Kleinfruit in open lucht	Oppervlakte weiland
<b>Balen</b>	226	100%	n.a.	n.a.	31 844
<b>Dessel</b>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	10 289
<b>Geel</b>	922	24%	71%	5%	85 326
<b>Kasterlee</b>	1200	100%	n.a.	n.a.	26 271
<b>Mol</b>	16550	86%	14%	n.a.	19 218
<b>Retie</b>	5867	82%	18%	n.a.	30 586

**Tabel 4 - 11: Gebruik van teelt in serres per oppervlakte-eenheid (are) voor Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen (bron NIS 2010). n.a. : geen beschikbare gegevens.**

	Oppervlakte serres(are)	Tuinbouw planten en – zaden in serres	Versgroenten	Sierteelt	Boomkwekerij	Fruitteelt in serres
<b>Balen</b>	5	n.a.	n.a.	n.a.	100%	n.a.
<b>Dessel</b>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
<b>Geel</b>	438	n.a.	89%	3%	n.a.	8%
<b>Kasterlee</b>	399	n.a.	18%	21%	n.a.	62%
<b>Mol</b>	67	n.a.	n.a.	25%	75%	0%
<b>Retie</b>	191	3%	n.a.	2%	95%	n.a.

### Veeteelt

In 2010 werd een veestapel van ongeveer 1,3 miljoen dieren geteld in Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen. De meeste van deze dieren zijn pluimvee (ongeveer 86%), 8% van de getelde dieren waren varkens. 5% van de getelde dieren in de gemeenten rond de bergingssite was rundvee (Tabel 4 - 12). Slechts een klein aantal zijn geiten, schapen en paarden (respectievelijk 0,13%, 0,05% en 0,03%).

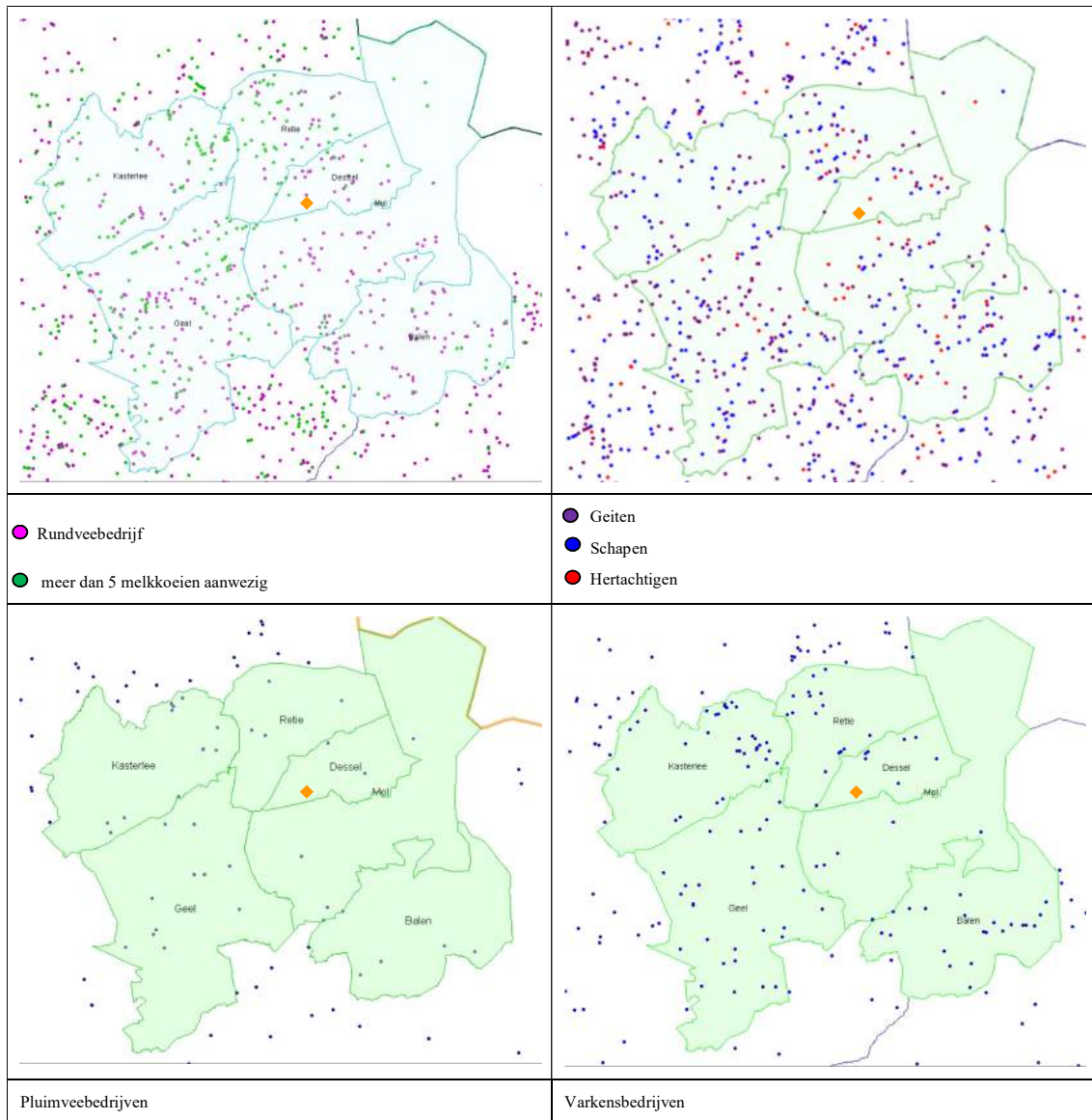
**Tabel 4 - 12: Aantal dieren per type voor Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen (bron: NIS, 2010).**

	Runderen	Varkens	Schapen	Geiten	Paardachtigen	Pluimvee
<b>Balen</b>	2258	20155	158	-	91	125457
<b>Dessel</b>	4350	6236	-	-	3	86000
<b>Geel</b>	28881	21198	105	24	270	243096
<b>Kasterlee</b>	15051	38858	261	674	40	573720
<b>Mol</b>	3362	2601	12	-	40	74000
<b>Retie</b>	17197	22356	141	999	13	48136

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

Zoals weergegeven in Tabel 4 - 13 kan het rundvee onderverdeeld worden in kalveren (64%), eenjarigen (10%), stieren (0,22%), vaarzen (3%), melkkoeien (18%) en voedster- of zoogkoeien (5 %). De verschillende types landbouwbedrijven zijn gelijkmatig verdeeld over de verschillende gemeenten (Figuur 4 - 25). Enkel in het noorden van de stad Mol ligt de dichtheid van landbouwbedrijven lager.



Figuur 4 - 25: Locatie van veeteeltbedrijven in de regio rond de bergingssite (oranjegele ruit).

Tabel 4 - 13: Aantal dieren per leeftijdsgroep en type voor Dessel, Mol, Retie, Geel, Kasterlee en Balen (bron: NIS, 2010).

	Kalf	Pink	Mannelijke	Vaarzen	Melk koeien	Zoog koeien
<b>Balen</b>	48%	13%	0.49%	3.5%	26%	9%
<b>Dessel</b>	83%	4%	0.09%	1.4%	10%	1%
<b>Geel</b>	74%	7%	0.27%	1.9%	13%	5%
<b>Kasterlee</b>	69%	9%	0.13%	2.3%	18%	2%
<b>Mol</b>	30%	21%	0.18%	9.3%	29%	10%
<b>Retie</b>	82%	4%	0.13%	2.1%	10%	2%

#### 4.3.3.2 Algemene beschrijving verkeersinfrastructuur

##### 4.3.3.2.1 Het wegennet

Het noordoosten van België heeft een zeer dichte verkeersinfrastructuur: Drie snelwegen (E34, E313 en E314) verbinden de regio met het Europese snelwegennet. De haven van Antwerpen ligt op 50 km van Mol / Dessel. Het grootste deel van het spoorwegverkeer is afgestemd op deze haven. Kanalen zijn belangrijke routes voor de scheepvaart. Ze vormen de verbinding tussen de industriegebieden van Luik en Antwerpen.

De belangrijkste wegen rond de site zijn (Figuur 4 - 26):

- N18: hoofdweg Turnhout-Retie-Dessel-Mol (circa 3 km ten oosten van de site)
- N118: secundaire weg Weelde-Arendonk-Retie-Geel (circa 1 km ten westen van de site)
- N123: secundaire weg Kasterlee-Retie-Postel (circa 4,5 km ten noorden van de site)
- E34 (A21): autosnelweg Antwerpen-Eindhoven (circa 8 km ten noorden van de site)
- N19: hoofdweg Turnhout-Geel (circa 7 km ten westen van de site)
- N71: hoofdweg Geel-Mol-Neerpelt-Hamont (circa 6 km ten zuiden van de site)

De site is gelegen langs de Europalaan, een privé-weg naar Belgonucléaire en FBFC International, die in verbinding staat met de N118 (Stenehei/Geelsebaan). Naar het noorden geeft de N118 aansluiting met de autosnelweg Antwerpen-Eindhoven en met de N18 naar Turnhout; naar het zuiden staat de N118 in verbinding met de N71 naar Mol/Neerpelt/Hamont en met de autosnelweg Antwerpen-Luik (E313).

##### 4.3.3.2.2 Transport via spoor

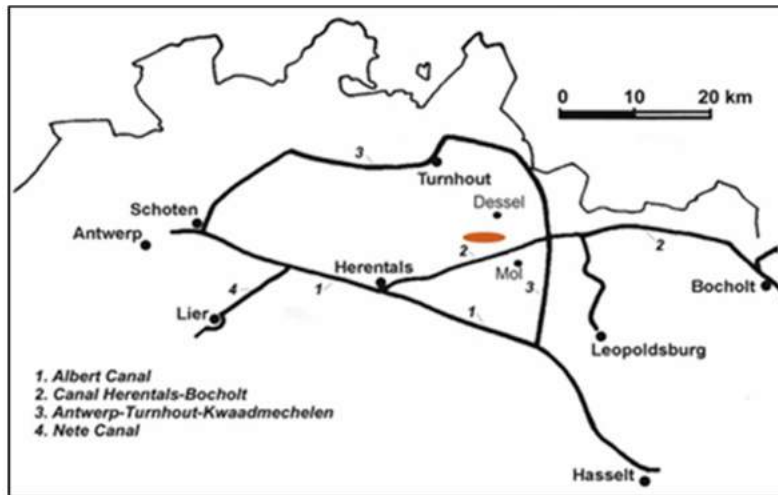
Ongeveer 4,5 km ten zuiden van de site bevindt zich de spoorweghoofdlijn Antwerpen-Hasselt of Hamont. Het dichtstbijzijnde station bevindt zich in Mol.



Figuur 4 - 26: Wegenkaart van de regio rond de bergingsite (oranje-gele ruit).

#### 4.3.3.2.3 Bevaarbare waterwegen

Naast de natuurlijke waterlopen, ligt de site in de buurt van enkele kunstmatige waterlopen. Een overzicht van het kanaalennetwerk is opgenomen in Figuur 4 - 27. Het kanaal *Bocholt-Herentals* (nr. 2 in Figuur 4 - 27) bevindt zich op ongeveer 350 m ten zuiden van de bergingsite. Het merendeel van de transporten van materialen die zullen worden gebruikt voor de bouw en de exploitatie van de berging zullen via het kanaal gebeuren. Het kanaal verbindt de Zuid-Willemsvaart in Bocholt met het Albertkanaal (nr. 1) in Herentals, ongeveer 60 km stroomafwaarts. Het kanaal Dessel-Turnhout-Schoten (nr. 3) heeft een minimale afstand van 6 km tot de site in oostelijke richting. Beide kanalen zijn bevaarbaar voor schepen tot 600 ton [R4-21]. Het kanaal Dessel-Kwaadmechelen (nr. 3) met een minimale afstand van 6 km tot de site in oostelijke richting is bevaarbaar voor schepen tot 1350 ton. Het Albertkanaal (ca. 13 km ten zuiden van het terrein) is bevaarbaar voor schepen tot meer dan 2000 ton. In Tabel 4 - 14 en Tabel 4 - 15 wordt een overzicht gegeven van het scheepvaartverkeer in de buurt van de bergingsite.



Figuur 4 - 27: Overzicht van het kanalenennetwerk in de omgeving van de toekomstige bergingssite in Dessel (oranje ovaal). Een overzicht van het scheepvaartverkeer op het kanaal Bocholt-Herentals wordt gegeven in Tabel 4 - 14 en Tabel 4 - 15.

#### 4.3.3.2.4 Luchtverkeer

Het Belgische luchtruim komt overeen met het nationale grondgebied en volgt dezelfde grenzen. Alle delen van het luchtruim boven België kunnen worden onderverdeeld in drie categorieën: (1) luchtruim onder militaire controle, (2), luchtruim onder burgerlijke controle en (3) niet-gecontroleerd luchtruim (bv. sportluchtvaart) [R4-22].

- Binnen een straal van 16 km rond de site zijn geen militaire vliegvelden gelegen. Hoewel de controlezone van Kleine Brogel, evenals zijn belangrijke naderingszones zich in dit gebied bevinden. Boven de site is echter een zone afgebakend waarbinnen vluchten van militaire toestellen verboden zijn (bijvoorbeeld Militair verboden gebied 29).
- Geen van de 5 Belgische burgerluchthavens, noch hun respectieve controlezones bevinden zich binnen een gebied van 16 km rond de site. De site bevindt zich evenwel onder een naderingszone van de luchthaven van Brussel.
- Binnen een straal van 16 km bevinden zich twee kleine vliegvelden zonder verkeerstoren: het vliegveld Balen / Keiheuvel is een klein privé vliegveld voor zweefvliegtuigen en kleine sportvliegtuigen. De luchthaven van Tielen / Kasterlee is een privé helihaven.

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

**Tabel 4 - 14: Scheepvaart verkeer [tonnage (aantal)] dat passeert aan de aanlegsteigers te Dessel, Mol-Donk en Geel over de jaren 2006, 2016 en 2017 (gegevens NV De Scheepvaart). Sinds de sluiting in 2014 van de kolengestookte electriciteitscentrale van Electrabel op de Balmatt-site is de scheepvaarttrafiek te Mol-Donk en Geel met ongeveer de helft verminderd.**

	2006			2016			2017		
	Dessel	Mol-Donk	Geel	Dessel	Mol-Donk	Geel	Dessel	Mol-Donk	Geel
landbouwproducten	6049 (23)	6049 (23)	6049 (23)	1542 (6)	1542 (6)	1542 (6)	4768 (19)	4768 (19)	4768 (19)
voeding / veevoeder	2959 (13)	2959 (13)	2959 (13)	715 (3)	715 (3)	715 (3)	720 (3)	720 (3)	720 (3)
vaste brandstoffen	12164 (21)	344527 (625)	333771 (605)	1073 (2)					
vloeibare brandstoffen	2104 (3)	2104 (3)							
schroot	520 (1)	520 (1)	520 (1)	2696 (3)	2350 (2)	2350 (2)			
metaalproducten	92 (1)	92 (1)	92 (1)	3165 (7)	1066 (2)	1066 (2)	1559 (3)	1141 (1)	2207 (3)
bouwmaterialen	117916 (219)	119214 (220)	123714 (229)	61381 (76)	125439 (405)	139676 (394)	32563 (67)	124851 (338)	128175 (341)
meststoffen	840 (3)	840 (3)	840 (3)	280 (1)	280 (1)	280 (1)			
chemische producten	303 (1)	303 (1)	303 (1)	1881 (4)	1881 (4)	1881 (4)	441 (2)	441 (2)	441 (2)
allerhande	1190 (1)	1190 (1)	1190 (1)	200 (6)	410 (15)	430 (15)	206 (9)	206 (9)	206 (9)
ledige schepen	0 (336)	0 (876)	0 (869)	0 (125)	0 (505)	0 (487)	0 (212)	0 (350)	0 (338)
<b>TOTAAL</b>	<b>144137 (622)</b>	<b>477798 (1767)</b>	<b>469438 (1746)</b>	<b>72735 (233)</b>	<b>132617 (943)</b>	<b>147940 (914)</b>	<b>40257 (315)</b>	<b>132127 (722)</b>	<b>136517 (715)</b>



Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

Tabel 4 - 15: Scheepvaart verkeer [tonnage (aantal)] dat aanlegt (voor laden en lossen) aan de aanlegsteigers op de locaties Dessel, Mol-Donk en Geel, voor de jaren 2006, 2016 en 2017 (gegevens NV De Scheepvaart). Het aantal ladingen /lossingen zijn voor de aanlegsteiger te Dessel gestegen, die voor aanlegsteiger Mol-Donk sterk gedaald door het wegvallen van de aanvoer van vaste brandstoffen voor de kolengestookte electriciteitscentrale (stilgelegd sinds 2014).

	2006			2016			2017		
	Dessel	Mol-Donk	Geel	Dessel	Mol-Donk	Geel	Dessel	Mol-Donk	Geel
vaste brandstoffen		343119 (624)							
vloeibare brandstoffen		2104 (3)						1400 (1)	
bouwmaterialen	111017 (210)	1725 (2)	6502 (13)	122105(330)	1792 (8)	23583 (59)	157618 (373)	24545 (50)	7556 (13)
Ertsen				2565 (3)					
Metaalproducten				2477 (6)	2010 (2)	1066 (2)	418 (2)		
Nijverheidsproducten				30608 (18)			451 (1)		
allerhande					7780 (24)		2400 (6)	11167 (18)	
<b>TOTAAL</b>	<b>111017 (210)</b>	<b>346948 (629)</b>	<b>6502 (13)</b>	<b>157755 (357)</b>	<b>11582 (34)</b>	<b>24649 (61)</b>	<b>160887 (382)</b>	<b>37112 (69)</b>	<b>7556 (13)</b>

#### 4.3.3.2.5 Aanwezigheid van pijpleidingen

##### FLUXYS

Een aardgasleiding van FLUXYS is ingegraven op een diepte van 80 cm en doorkruist de streek. Om het kanaal Bocholt-Herentals over te steken komt deze leiding bovengronds tussen Belgoprocess en de vroegere Electrabel-centrale. De aardgasleiding ligt op een afstand van ongeveer 1100 m ten noorden en 950 m ten oosten van de bergingssite. De leiding heeft een uitwendige diameter van 324 mm. De werkdruk bedraagt 66,2 barg en de gemiddelde temperatuur van het gas bij normale werking bedraagt 10 °C. Het jaardebiet aan gas bedraagt ongeveer 400 miljoen m<sup>3</sup>, wat neerkomt op een gemiddeld uurdebiet van 45 000 m<sup>3</sup>. Een ontspanstation van Fluxys bevindt zich in zuidoostelijke hoek van NIRAS site Belgoprocess 1 vlak naast het kanaal Bocholt-Herentals. De druk wordt er gereduceerd van 66,2 barg naar 5 barg. De afstand van het ontspanstation tot de projectsite bedraagt ongeveer 1 km.

##### PRAXAIR

Een stikstofleiding van PRAXAIR ligt 6 km zuidoostwaarts van de site aan het kanaal Dessel-Kwaadmechelen.

##### AIR LIQUIDE

Een stikstofleiding van AIR LIQUIDE ligt op 6 km ten zuidoosten van de projectsite aan het kanaal Dessel-Kwaadmechelen.

##### BELGOPROCESS

Sedert 1956 worden er radioactieve effluënten geloosd in de Molse Nete. Dit gebeurt via een ongeveer 10 km lange pijpleiding die vertrekt ter hoogte van NIRAS site Belgoprocess 2. Belgoprocess behandelt de radioactief besmette afvalwaters van de nucleaire bedrijven in Mol-Dessel en loost de gezuiverde afvalwaters in de Molse Nete. De lozingen in de Molse Nete bedroegen in 2012 voor tritium 1340 GBq en voor de andere bètastralers 0,19 GBq [R4-23]. De lozingsleiding is een enkelvoudige asbestcement leiding bestaande uit buizen van 4 of 6 meter die met speciale verbindingstukken (moffen) met elkaar verbonden zijn. De fabrikant van deze materialen is Eternit. De binnendiameter van deze afvoerleidingen is 200 mm en de wanddikte bedraagt 13 mm.

#### 4.3.3.3 Demografie

Terwijl België een gemiddelde bevolkingsdichtheid heeft van 349 inwoners per km<sup>2</sup>, zijn Dessel en de omliggende gemeenten (Mol, Geel, Retie, Kasterlee en Balen) op basis van bevolkingsgegevens van 1 januari 2017 minder dicht bevolkt met een gemiddelde dichtheid van 304 inwoners per km<sup>2</sup> [R4-24]. Demografische gegevens voor Dessel en de aangrenzende gemeenten zijn opgenomen Tabel 4 - 16. De verdeling van de bevolking binnen een straal van 10 km is weergegeven in Figuur 4 - 28 (toestand 2008).

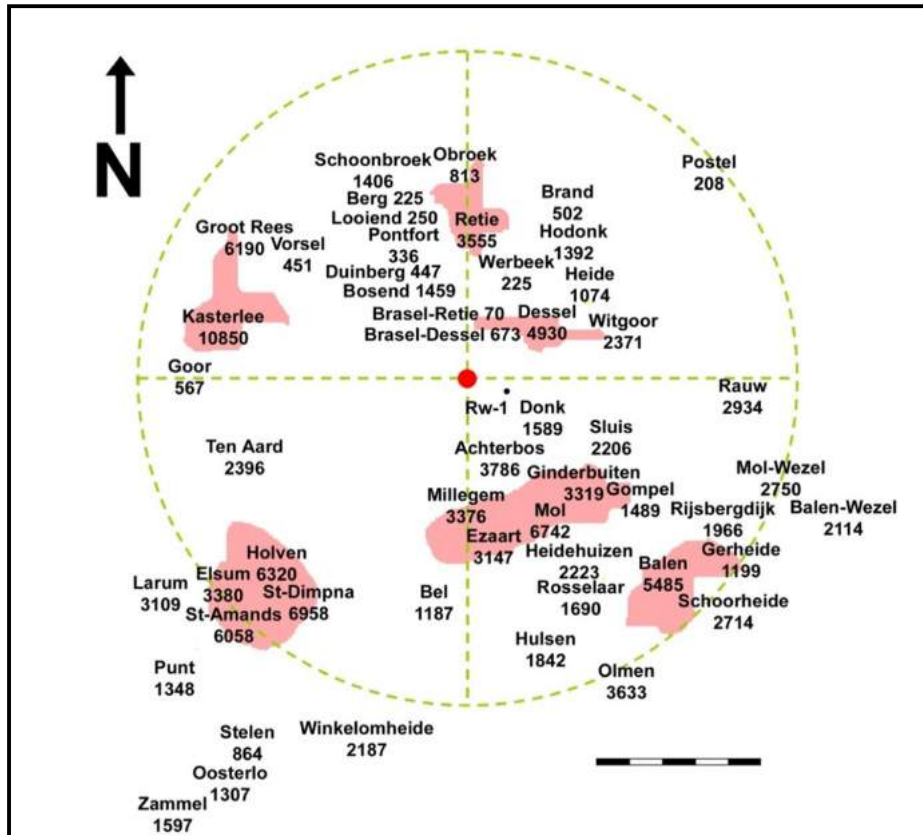
Zoals weergegeven in Figuur 4 - 29 is de bevolking van Dessel sterk toegenomen in de afgelopen eeuw. Het is echter moeilijk om prognoses over de te verwachten toekomstige omvang en structuur van de bevolking te maken, vooral op zeer lange termijn (honderden tot duizenden jaren).

Tabel 4 - 16: Demografische data voor Dessel en omgeving ([R4-24]; \* bron: Census 2011-FOD Economie)

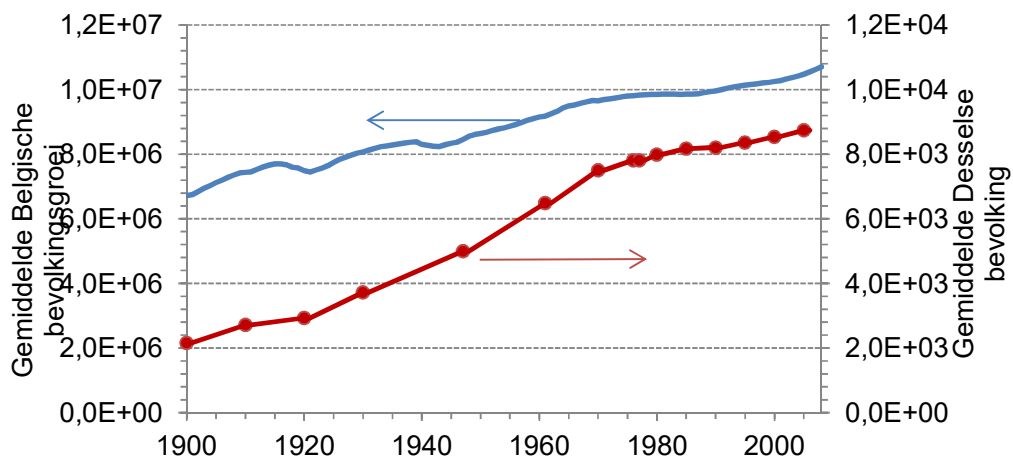
	Dessel	Mol	Retie	Geel	Balen	Kasterlee
<b>Inwoners (01/01/2017)</b>	9527	36151	11184	39560	22356	18501
Mannen (01/01/2017)	4770	17953	5609	19823	11123	9358
	50,07%	49,66%	50,15%	50,11%	49,75%	50,58%
Vrouwen (01/01/2017)	4757	18198	5575	19737	11233	9143
	49,93%	50,34%	49,85%	49,89%	50,25%	49,42%
<b>Bevolkingsgroei sinds 01/01/2005</b>	8,91%	11,31%	9,99%	13,82%	11,11%	3,36%
<b>Bevolkingsdichtheid (inwoners per km2)</b>	352	316	231	360	307	259
<b>Leeftijd distributie (01/01/2017)*</b>						
0-19 jaar	2069	7583	2412	8143	4747	3742
	21,72%	20,98%	21,57%	20,58%	21,23%	20,23%
20-64 jaar	5598	21472	6668	23867	13387	11138
	58,76%	59,40%	59,62%	60,33%	59,88%	60,20%
65 jaar en ouder	1860	7096	2104	7550	4222	3621
	19,52%	19,63%	18,81%	19,08%	18,89%	19,57%
<b>Gemiddelde leeftijd (01/01/2012) [y]*</b>	41,22	42,22	40,83	41,73	41,57	41,38
<b>Buitenlanders (01/01/2017)</b>	6,1%	10,1%	9,3%	6,5%	5,3%	4,5%
<b>Mate van werkloosheid</b> <sup>01/01/2016</sup>	6,40%	7,68%	5,83%	7,00%	6,64%	5,78%

Eurostat, het bureau voor statistiek van de Europese Unie, genereerde de demografische vooruitzichten voor de Europese gemeenschappen tot 2060 [R4-25]. De bevolking in de EU-lidstaten zal naar verwachting geleidelijk stijgen tot 2035 (520,7 miljoen) en vervolgens dalen (505,7 miljoen). De bevolking van België zal deze trend echter niet volgen. Men verwacht een continue stijgende aangroei tot 11,7% in 2035 en tot 15,4% tegen 2060 (vergeleken met de referentiedatum van 01/01/2008). Naar verwachting zal de mediaanleeftijd van de Europese bevolking stijgen van 40,4 jaar in 2008 tot 47,9 jaar in 2060.

De studie toont eveneens aan dat de verhouding tussen afhankelijke jongeren en werkende personen binnen de Europese bevolking naar verwachting licht zal stijgen tot 25,0 % in 2060, terwijl de verhouding tussen afhankelijke ouderen en werkende personen naar verwachting aanzienlijk zal toenemen van het huidige niveau van 25,4% tot 53,5% in 2060. In 2008 waren er 4 werkende personen in de leeftijd (15-64 jaar) voor elke 65-jarige of ouder; in 2060 zal naar verwachting de verhouding 2 op 1 zijn. Gegevens over de omvang van particuliere huishoudens voor Dessel en omliggende gemeenten staan samengevat in Tabel 4 - 17 [R4-26].



Figuur 4 - 28: Verdeling van de bevolking binnen een straal van 10 km rond de bergingssite (rode stip) op basis van cijfers van 2008.



Figuur 4 - 29: Evolutie van de gemiddelde Belgische (blauw) en Desselse bevolking (rood) sinds 1900 tot 2008 (bron NIS).

**Tabel 4 - 17: Samenstelling van het huishouden voor Dessel en omliggende gemeenten (gebaseerd op gegevens van de bevolking op 01/01/2005)**

	aantal huishoudens	collectiviteiten	particuliere huishoudens - aantal leden							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Dessel	3463	0,06%	21%	38%	17%	18%	4,3%	1,2%	0,23%	0,09%
Mol	13 261	0,16%	26%	35%	17%	16%	4,6%	1,0%	0,29%	0,15%
Retie	3930	-	21%	35%	17%	19%	6,3%	1,1%	0,20%	0,08%
Geel	14 116	0,19%	28%	33%	17%	15%	4,4%	1,1%	0,27%	0,13%
Balen	8032	0,09%	22%	36%	19%	16%	4,4%	0,9%	0,31%	0,05%
Kasterlee	6749	0,10%	21%	34%	17%	19%	7,1%	1,5%	0,28%	0,13%

#### 4.3.3.4 Levensgewoonten

##### 4.3.3.4.1 Mate van grondwaterbevoorrading

Het noordoosten van België is essentieel voor grondwaterbevoorrading voor industrieel en huishoudelijk gebruik. Water uit de watervoerende laag van het Diestiaan wordt opgepompt in Mol Sluis en Westerlo door PIDPA, die Dessel en omliggende gemeenten met drinkwater bevoorraadt.

In de provincie Antwerpen heeft het waterbedrijf Pidpa ongeveer 300 productieputten in 25 productiegebieden (Figuur 4 - 30). Het oppompen van grondwater door Pidpa benadert een volume van 64 miljoen m<sup>3</sup> op jaarbasis. Het merendeel van het water wordt gewonnen uit de watervoerende lagen van de formaties van Diest, Berchem en Voort.



In de omgeving van de site in Dessel bestaan er diverse productieputten voor grondwater die eigendom zijn van het waterwinningsbedrijf PIDPA. Het grondwaterproductiecentrum in Mol-Sluis met zeven productieputten, op ongeveer 4,5 km ten oosten van de bergingsite, is de dichtstbijzijnde. Water wordt opgepompt uit zowel de bovenste als de onderste waterhoudende laag. In de gemeente Westerlo wordt water uit de onderste waterhoudende laag gepompt vanop een diepte van ongeveer 60 m, voor drinkwater voor de regio Dessel en Mol. Het ijzergehalte van het water is hoog en het moet gedeïoniseerd worden vooraleer het geschikt is voor menselijke consumptie. Ook in Balen en Oud-Turnhout zijn waterproductiecentra aanwezig. Meer informatie over de waterproductiecentra van Pidpa in Mol, Balen, Westerlo en Oud-Turnhout zijn weergegeven in Tabel 4 - 18.

**Tabel 4 - 18: Locatie, diepte en vergund debiet van de waterproductiecentra van Pidpa in Mol, Balen, Westerlo en Oud-Turnhout (bron DOV; x en y in Lambert-coördinaten).**

Locatie	x	y	Aantal putten	Diepte (m)	Aquifer (HCOV <sup>23</sup> )	Einddatum vergunning	Vergund debiet (m <sup>3</sup> /dag)	Vergund debiet (m <sup>3</sup> /a)
Mol	204400	212459	7	125	0250	27-nov-17	10 <sup>4</sup>	3×10 <sup>6</sup>
Balen	204423	201552	11	170	0250	20-aug-25	2,08×10 <sup>4</sup>	6,25×10 <sup>6</sup>
Balen	207107	204343	6	170	0250	20-aug-25	7,2×10 <sup>3</sup>	1,75×10 <sup>6</sup>
Westerlo	189727	198056	17	62,5	0252	19-aug-25	1,1×10 <sup>4</sup>	4,051×10 <sup>6</sup>
Oud-Turnhout	196120	220330	10	175	0250	01-apr-19	2×10 <sup>4</sup>	4,5×10 <sup>6</sup>

<sup>23</sup> HCOV staat voor Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen



Figuur 4 - 30: Pidpa activiteiten in de provincie Antwerpen: ■ water productie centrum<sup>24</sup>; □ water extractie punt<sup>25</sup> (satelliet centrum); ● watertoren (in bedrijf); ○ watertoren (buiten bedrijf); △ waterdruk pompstations;  lokaal registratie en exploitatie bureel;  lokaal informatie centrum (van [R4-27]). The locatie van de bergingsite is aangeduid met een oranje ruit.

Naast de commerciële exploitatie wordt eveneens water uit de bovenste watervoerende laag opgepompt door lokale bedrijven (Tabel 4 - 19). Hoewel oppompen van grondwater voor privégebruik meestal gebeurt door landbouwers, wordt de (bovenste) waterhoudende laag ook meer en meer gebruikt voor irrigatie van particuliere moestuinen.

<sup>24</sup> locatie waar PIDPA grondwater oppomt en zuivert tot drinkwater

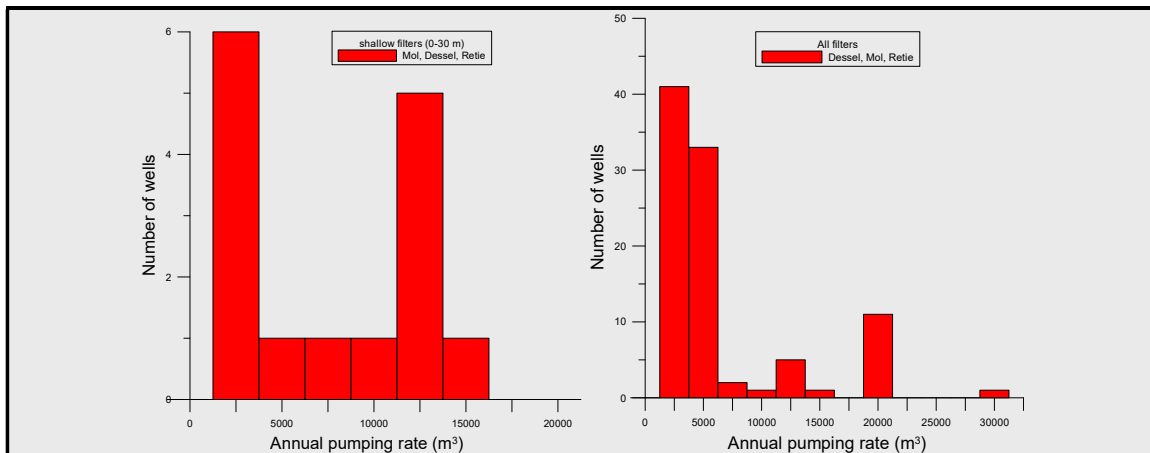
<sup>25</sup> locatie waar PIDPA grondwater oppomt; voor zuivering wordt het water doorgepompt naar een water productie centrum

**Tabel 4 - 19: Toegelaten gebruik van grondwater (m<sup>3</sup>/dag) door verschillende lokale industrieën [R4-28]. n: aantal; G: gemiddelde; SD: standaarddeviatie.**

	n	G	SD	min	max
Proceswater	65	326	275	2	1000
Koelwater	13	1627	1369	750	3600
Irrigatie	21	316	324	1	1000
Vee	77	73	155	2	450
Andere	51	418	468	3	1920

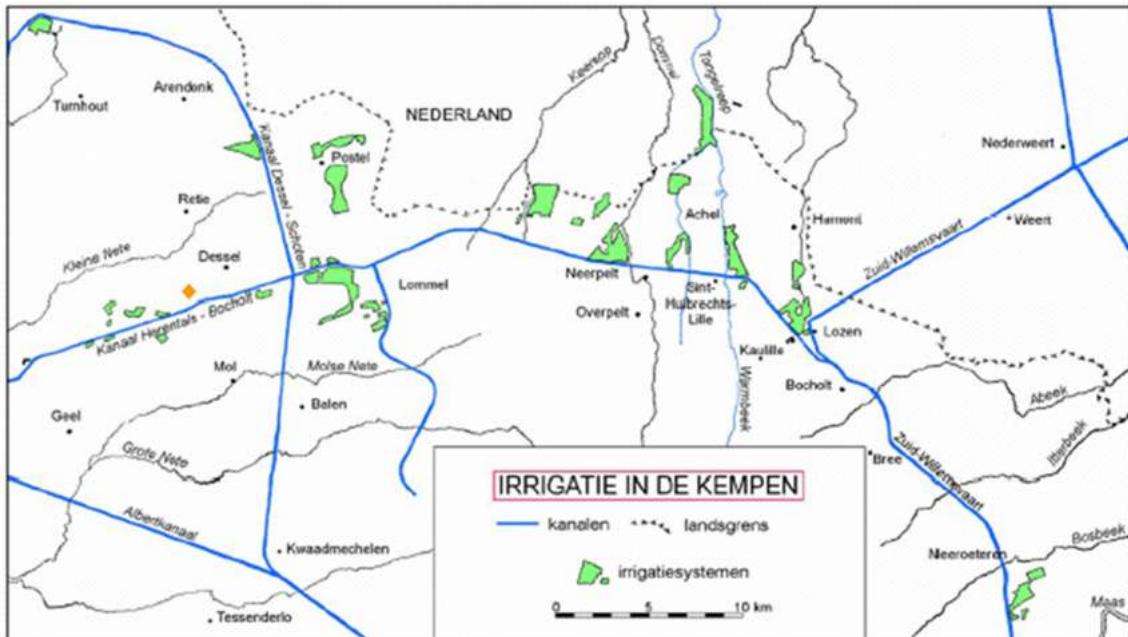
Gebaseerd op een statistische analyse van de AMINAL-databank (databank vergunningen categorie A en B; [OD-051]) op de grondwaterwinningsvergunningen in de gemeenten Mol, Dessel en Retie konden de gemiddelde opgepompte debieten worden geschat (Figuur 4 - 31; [OD-051]). De zoekcriteria toegepast op de databank omvatten enkel de categorie 'landbouwers' gecombineerd met putfilters die zich op minder dan 30 m onder het maaiveld bevinden.

Wanneer alle filters in rekening werden gebracht, blijkt dat het gemiddelde pompdebiet voor ondiepe filters (<30 m) 6800 m<sup>3</sup>/a bedraagt, voor alle filters is het gemiddelde pompdebiet 5200 m<sup>3</sup>/a.



**Figuur 4 - 31: Frequentie verdeling van de vergunde jaarlijkse pompdebieten van ondiepe filters (links) en alle filters (rechts).**

Landbouwers in de regio hebben ook waterputten voor privégebruik. De regio wordt immers gekenmerkt door belangrijke (zuivel) landbouw, waarbij in de onmiddellijke nabijheid van de bergingsinstallatie, 68% van de landbouwactiviteiten geconcentreerd zijn op veeteelt. De productie van vlees en graangewassen is beperkt en de graangewassen zijn bestemd voor lokaal gebruik (veevoeder). Op de droge zandgronden worden de voedselgewassen, zoals maïs en groenten, geïrrigeerd. Een overzicht van de geïrrigeerde grond (door grondwater onttrokken uit putten of oppervlaktewater) wordt weergegeven in Figuur 4 - 32. Er wordt weinig irrigatie toegepast in de onmiddellijke omgeving van de bergingsite.



Figuur 4 - 32: Geïrrigeerd land in het studiegebied [R4-29]. De bergingssite is aangeduid met een oranje ruit.

#### 4.3.3.4.2 Voedingsgewoonten

Momenteel is er slechts een geringe mate van voedselzelfvoorziening in de regio Dessel-Mol. Dit als gevolg van het feit dat de landbouw is gemoderniseerd en het belang van de industrie en de dienstensector in de economie is toegenomen. Hierdoor is landbouw veel minder belangrijk geworden als bron van werkgelegenheid [R4-30].

Wat de gemiddelde voedingsgewoonten van de Belgische bevolking betreft zijn de verschillen tussen de regio's gering. Consumptiecijfers voor volwassenen in België zijn weergegeven in Tabel 4 - 20. Voor verdere details wordt verwezen naar (Tabel 21 in [OD-043]). De bijdrage van het natuurlijke ecosysteem aan de voeding van de bevolking is verwaarloosbaar. Wat klein wild, vooral konijnen, mag worden bejaagd en gegeten.

#### 4.3.3.4.3 Gebruik van oppervlaktewater

Kleine rivieren, zoals de Witte Nete worden niet gebruikt als bron van drinkwater, de grotere rivieren zoals de Kleine en Grote Nete worden hiervoor wel gebruikt. Ze worden ook gebruikt om het grondwater kunstmatig aan te vullen. Zwemmen of vissen in deze rivieren is niet gebruikelijk, maar andere recreatieve activiteiten, zoals kajakken worden wel beoefend. Rivier- en beekwater kan ook worden aangewend voor irrigatie en het drenken van vee, soms halen vissers larven uit de rivier. Een overzicht van de oppervlaktewaters in de omgeving van de bergingssite is gegeven in Figuur 4 - 63 (§4.6.1.2).



**Tabel 4 - 20: Gemiddelde inname [kg/a] van de Belgische volwassen bevolking en de Standaard Deviatie (SD), cijfers overgenomen uit [OD-043].**

	Voedselinname voor volwassenen [kg/a]	
	Gemiddelde	SD
Drinkwater [m <sup>3</sup> /a]	0,4386	0,2165
Zuivel en zuivelproducten (Koemelk producten)	77,4	47,5
Melk producten (exclusief kaas)	57,9	46,3
Kaas	11,0	6,6
<i>Lubricating fat</i> (margarine)	7,7	8,2
<i>Preparation fat</i> (margarine)	0,8	0,9
Schapenmelk	4,3 <sup>1)</sup>	n.a.
Geitenmelk	0,8 <sup>1)</sup>	n.a.
Vis	6,5	5,0
Vlees	44,1	16,1
Rund	12,1 <sup>2)</sup>	n.a.
Varken	7,8 <sup>2)</sup>	n.a.
Schaap/Lam	2,4 <sup>2)</sup>	n.a.
Geiten	0,02 <sup>2)</sup>	n.a.
Gevogelte	7,0	4,6
Haas en konijn	1,0	5,5
Rest	13,8 <sup>3)</sup>	n.a.
Groenten	50,5	19,2
Peulvruchten	2,1 <sup>2)</sup>	n.a.
Bladgroenten	23,7 <sup>2)</sup>	n.a.
Niet-bladgroenten	19,4 <sup>2)</sup>	n.a.
Wortelgewassen	5,3 <sup>2)</sup>	n.a.
Aardappelen	111,9	53,1
Granen & graan producten	48,5	21,6
Fruiten	43,1	30,8
Eieren	3,7	3,0
Restgroep	175,6	144,2

<sup>1)</sup> gegevens gebaseerd op data van het Belgisch statistiekbureau (NIS; [http://www.statbel.fgov.be/home\\_en.asp](http://www.statbel.fgov.be/home_en.asp));

<sup>2)</sup> afgeleid uit oorspronkelijke dataset; <sup>3)</sup> op vlees gebaseerde producten.

Vissen wordt vooral beoefend op de verschillende vijvers en in de kanalen. Sommige kanalen worden niet alleen gebruikt voor transport en irrigatie, maar kunnen ook dienen als drinkwaterbron voor de regio Antwerpen. Water uit het Albertkanaal wordt gebruikt om de watervoerende laag kunstmatig aan te vullen. Een aantal andere recreatieve activiteiten, zoals waterskiën, kunnen plaatsvinden op het Albertkanaal of het kanaal Herentals-Bocholt.

De kunstmatige meren in de regio zijn het gevolg van het beëindigen van de zandwinning en worden voornamelijk gebruikt als natuurreservaten, recreatiegebieden en kampeerterrinen (zoals thans het geval is voor bv. het Zilvermeer). De diepte van een aantal van deze meren bedraagt meer dan 20 m. In de lagune die aan het SCK•CEN grenst, maar ook op andere plaatsen, worden recreatieve activiteiten beoefend zoals zeilen en zwemmen.

In het verleden werd ook beperkt turf gestoken langs de oevers van bijvoorbeeld de Witte en de Molse Nete. Dit heeft geleid tot een aantal kleine en ondiepe vijvers, die gevoed worden door grondwater en voornamelijk gebruikt worden voor recreatieve activiteiten (sportvissen, ...).

### 4.3.3.5 Voorziene menselijke activiteit

#### 4.3.3.5.1 Transportinfrastructuur

De provincie Antwerpen, Departement Ruimtelijke Ordening en Mobiliteit, heeft een mobiliteitsstudie laten uitvoeren voor de N118. De studie had tot doel de rol van deze weg, gelegen tussen Geel en het oprittencomplex van de autoweg E34 in Retie (voor de ligging, zie Figuur 4 - 1 en Figuur 4 - 26), te bepalen binnen een visie op de regionale ontsluiting. De studie oppert het idee om de N118 op te waarderen als ontsluitingsweg in functie van de verschillende bedrijvenszones die aansluitend bij de kleinstedelijke gebieden Mol en Geel gelegen zijn of zullen ontwikkeld worden. De N118 verzorgt op deze manier een ontsluiting naar het hoger wegennet: de E34 in het noorden en de N71 en E313 in het zuiden. Hierdoor wordt de N18 ontlast van vrachtverkeer en wordt overlast in de kernen van Mol, Dessel en Retie voorkomen. In deze studie werd rekening gehouden met een uitbreiding van de KMO-zone Stenehei met ca. 10 ha, zoals ook voorzien in het kader van het cAt-project.

Naast het uitvoeren van een ruimtelijke en verkeerskundige analyse van het projectgebied is ook de impact van ruimtelijke en verkeerskundige ontwikkelingen bestudeerd. Bovendien is voor de voorgestelde nieuwe en her in te richten infrastructuur ontwerpend onderzoek gebeurd, waarbij de haalbaarheid van de voorgestelde maatregelen en de kostprijs in beeld zijn gebracht.

- de belangrijkste voorstellen op gebied van wegencategorisering en voor nieuwe infrastructuur zijn de volgende: voorstel voor selectie van de N118 als secundaire weg type II (ontsluitend) en de N18 (tussen Mol en Retie) als secundaire weg III (openbaar vervoer- en fietsas). De profilering van de N118 zelf blijkt voldoende te zijn en hier worden geen infrastructuurwerken voorzien. De problemen situeren zich enkel ter hoogte van de aantakkingen;
- een nieuwe noordelijke of oostelijke verbinding tussen de N118 en de N19/R14 (ring van Geel);
- de doortrekking en herinrichting van de ring in Retie die deels uitgevoerd werd;
- verbinding tussen de N118 en de N18 in Mol Donk-Goormansdijk: ten noorden of ten zuiden van het kanaal Bocholt-Herentals (varianten onderzocht i.o.v. provant in 2015).

De provincie geeft met de studie een antwoord op de belangrijkste planologische vraagstukken voor het gebied en reikt met het voorgestelde actieplan een kader aan voor verder te ondernemen acties. Intussen werd een protocol afgesloten tussen de verschillende betrokkenen<sup>26</sup> met de opname van een aantal cruciale investeringen

---

<sup>26</sup> de gemeenten Mol, Dessel, Retie en Geel, de Vlaamse Overheid, de Provincie en IOK

die nodig zijn ter bevordering van de mobiliteit en leefbaarheid van de gemeenten Dessel, Mol, Retie en Geel. De betrokkenen engageren zich in dit Protocol om een concrete invulling te geven aan deze investeringen. In de partiële herziening van het RSPA (M.B. 04/05/2011) is de opwaardering van de N118 van lokale weg tot secundaire weg type II opgenomen. De N18 wijzigt van secundaire weg II naar secundaire weg III.

Als uitvoering van de provinciale mobiliteitsstudie en in het kader van de afbakening van de kleinstedelijke gebieden Geel en Mol moet er een (lokale) verbindingsweg aangelegd worden tussen de N18 en de N118. Deze verbindingsweg zal ten noorden of ten zuiden van het kanaal Bocholt-Herentals lopen en vervolgens langsheen het projectgebied (via de Gravenstraat en de Kastelsedijk) naar de N118 gaan. De technische haalbaarheid van een aantal varianten werd in 2015 i.o.v. de provincie Antwerpen onderzocht. Er werden nog geen verdere officiële stappen gezet in dit dossier.

#### 4.3.3.5.2 Stedelijke en industriële ontwikkeling

De uitbreiding van Stenehei met 10 ha in oostelijke richting houdt een inname van een gemengd bos en landbouwgrond in. Voor dit verlies aan landbouwgrond dienen milderende maatregelen genomen te worden. De terreinen kunnen in het nulscenario eveneens ingenomen worden omdat ze bestemd zijn als zone voor nucleaire activiteiten. Dit planonderdeel laat de herstemming toe van het gebied bestemd voor de vestiging van kerninstallaties. Door de herbesteding kunnen er zich kleinschalige gemengde regionale bedrijven vestigen. Het plan komt op die manier tegemoet aan de vraag naar bijkomende kmo-zones. Anderzijds betekent het plan een vermindering van het beschikbare areaal voor nucleaire activiteiten.

Een deel van de uitbreiding van Stenehei viel wel binnen de exclusiezone die door het FANC werd opgelegd. Daarom werd er tussen NIRAS en IOK een grondruil uitgevoerd waardoor de uitbreiding van de KMO-zone Stenehei buiten de 200m perimeter grens opgelegd door het FANC valt.

Voor een aantal bedrijfssectoren zijn in Vlarem II afstandsregels opgenomen. Dergelijke afstandsregels gelden o.a. voor intensieve veehouderij, mestverwerking en bepaalde bedrijven uit de voedingssector. De kmo-zone Stenehei is bestemd voor de vestiging van bedrijven met als hoofdactiviteiten (i) productie, verwerking en recyclage van goederen, (ii) bouwnijverheid en (iii) onderzoeks- en ontwikkelingsactiviteiten (stedenbouwkundige voorschriften PRUP). Rekening houdend met de huidige invulling van de kmo-zone Stenehei en de beperkte grootte van de kavels kan aangenomen worden dat het type bedrijf waarvoor afstandsregels gelden zich niet in deze kmo-zone zullen vestigen. De omzetting van een deel van het gebied bestemd voor 'de vestiging van kerninstallaties' naar een gebied voor recreatiebestemming zal in dit opzicht dan ook geen consequenties hebben. Meer informatie over de voorziene industriële activiteiten in de regio is te vinden in [R4-31].

In het verleden werd er reeds een plan-MER opgemaakt in het kader van de realisatie van de maatschappelijke randvoorwaarden van het geïntegreerd bergingsproject. De concrete aanleiding voor de opmaak van dit plan-MER is de bouw van het bezoekers- en gemeenschapscentrum TABLOO. Voor de bouw van dit centrum werd door NIRAS en het partnerschap STORA een locatie op de hoek van de Gravenstraat en de Kastelsedijk geselecteerd. Deze locatie is op het gewestplan bestemd als nucleaire zone en deze bestemming is niet verenigbaar met de functies van het bezoekers- en gemeenschapscentrum TABLOO. Er was dus een bestemmingswijziging noodzakelijk en aangezien het centrum een MER-plichtig project is, diende het RUP waarmee deze bestemmingswijziging zal worden gerealiseerd, voorafgegaan te worden door een plan-MER. In dit plan-MER werd niet enkel de impact van het bezoekers- en gemeenschapscentrum TABLOO bekeken, maar

ook de impact van de andere projectonderdelen die binnen de nucleaire zone zullen worden gebouwd (bergingsmodules, IPM, caissonfabriek, kade) en de impact van de uitbreiding van de KMO-zone Stenehei. Het plan-MER met referentie PL105 werd goedgekeurd op 05/04/2012. Daarna werd gestart met de opmaak van een GRUP voor de inplanting van het centrum op deze locatie. Het besluit tot goedkeuring van het GRUP door de Vlaamse Regering werd genomen op 21 november 2014. Het GRUP werd gepubliceerd in het staatsblad op 10/12/2014 en is van kracht sinds 24/12/2014.

#### 4.3.3.5.3 Evoluties in landbouwgebruik

Uit gegevens van de provincie Antwerpen van 2011 blijkt dat in Mol en Dessel 31% tot 40% van het oppervlak wordt gebruikt als landbouwgrond terwijl dit 61 tot 75% van het oppervlak is in Retie [R4-32]<sup>27</sup>. Ook is de laatste 20 jaar de totale landbouwgrond in de provincie Antwerpen met 2% afgenomen. Ongeveer 2400 ha landbouwgrond kreeg een nieuwe bestemming als natuurgebied, industriegebied, woongebied of recreatiegebied. Ook leggen allerlei niet klassieke agrarische functies, bijvoorbeeld het gebruik van landbouwgrond als weiden voor paarden of recreatieruimte in toenemende mate beslag op landbouwgrond [R4-33]. Verwacht wordt dat een gelijkaardige trend zich heeft voorgedaan in de regio Mol-Dessel-Retie en wordt voortgezet in de komende jaren. Uit de gemeentelijke structuurplannen van Mol, Dessel, Retie blijkt dat men blijft streven naar het behoud van landbouwactiviteit.

---

<sup>27</sup> Cijfers zijn gegeven als een bereik (*range*).

## 4.4 Meteorologie en klimatologie

### 4.4.1 Huidig klimaat in België

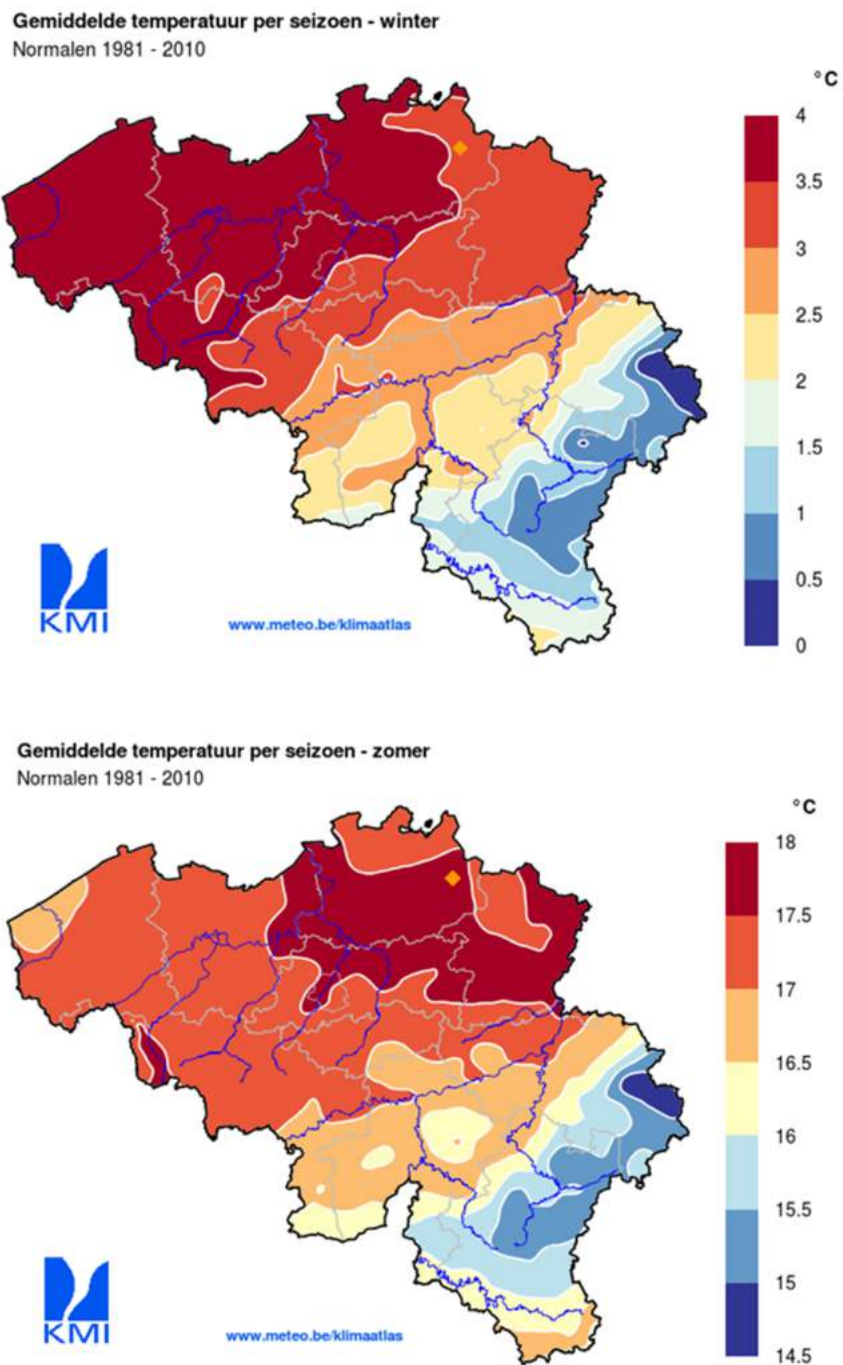
Het huidige klimaat in België is een gematigd zeeklimaat ('DO' volgens de indeling van Trewartha [R4-34]). De geografische ligging van België op de gemiddelde breedtegraad van het noordelijk halfrond, breedtegraad 50°48'N (Koninklijk Meteorologisch Instituut te Ukkel) en de nabijheid van de Atlantische oceaan, bepalen de grote lijnen van het klimaat. Op deze gemiddelde breedtegraad ontmoeten koude luchtmassa's van noordelijke oorsprong de warme luchtmassa's van subtropische origine. Het scheidingsoppervlak tussen deze twee luchtmassa's wordt het poolfront genoemd. De wisselende positie van het poolfront doet het weer veranderen. De twee luchtmassa's zijn voortdurend in conflict en kunnen elk tijdelijk het gebied domineren, maar geen van beide heeft exclusieve controle.

Lage drukgebieden verbonden met het poolfront leiden tot overheersende westelijke winden die vocht uit de Atlantische Oceaan aanvoeren. De windrichting bepaalt ons weer door de aanvoer van verschillende luchtmassa's: milde, vochtige luchtmassa's door de overheersende zuidelijke tot westelijke winden en onstabiele, koele luchtmassa's door de westelijke tot noordelijke winden. Minder vaak voeren oostelijke tot noordelijke winden of zelfs nog zeldzamer oostelijke tot zuidelijke winden droge, koude / warme lucht in de winter / zomer aan [R4-35]. Algemeen genomen zijn de zomers relatief koel en regenachtig, de winters relatief mild en nat.

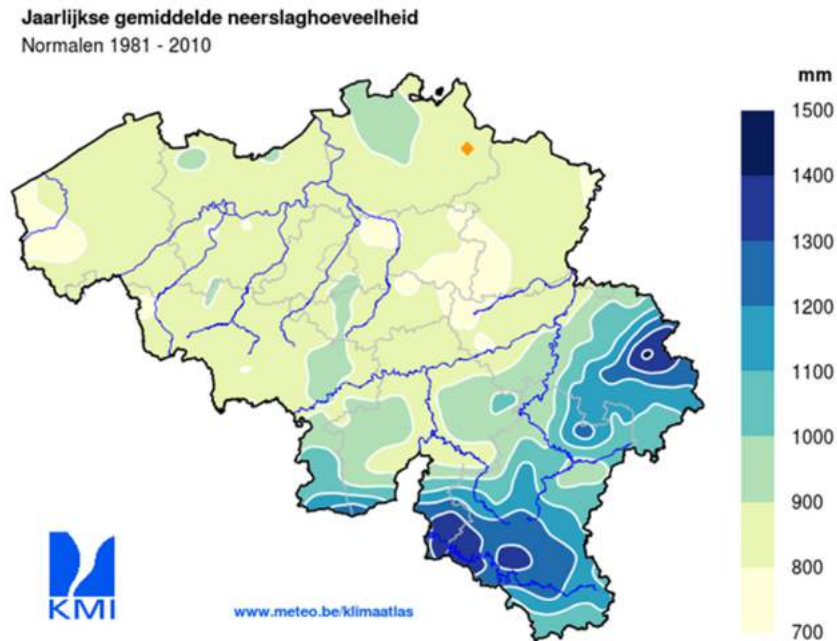
Tabel 4 - 21 geeft de maandgemiddelden voor de weervariabelen over de periode 1981-2010 (1901-2000 voor sommige variabelen) te Ukkel, dat het referentiestation voor België is. Isothermen en isohyeten voor België zijn weergegeven in Figuur 4 - 33 en Figuur 4 - 34.

**Tabel 4 - 21: Huidige klimaatkarakteristieken van het KMI station te Ukkel. † periode 1981-2010; ‡ periode 1901-2000 [R4-35] .**

	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jaar
Gemiddelde temperatuur (°C)†	3,3	3,7	6,8	9,8	13,6	16,2	18,3	18,0	14,9	11,1	6,8	3,9	10,5
Gemiddelde max. temperatuur (°C)†	5,7	6,6	10,4	14,2	18,1	20,6	23,0	22,6	19,0	14,7	9,5	6,1	14,2
Gemiddelde min. temperatuur (°C)†	0,7	0,7	3,1	5,3	9,2	11,9	14,0	13,6	10,9	7,8	4,1	1,6	6,9
Gemiddelde neerslag (mm)†	76,1	63,1	70,0	51,3	66,5	71,8	73,5	79,3	68,9	74,5	76,4	81,0	852,4
Max. neerslag (mm)‡	143,6	149,0	138,1	130,4	145,6	153,7	196,5	231,2	198,8	227,1	174,6	171,9	1088,5†
Min. neerslag (mm)‡	2,6	5,9	4,2	6,0	9,3	12,1	5,9	10,4	4,7	5,2	18,8	10,0	406,4 (639,5†)
Gemiddeld aantal neerslagdagen†	19,2	16,3	17,8	15,0	16,2	15,0	14,3	14,5	15,7	16,6	18,8	19,3	198,7
Gemiddeld aantal sneeuwdagen†	4,2	5,1	3,2	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	4,0	19,2
Gemiddelde relatieve vochtigheid (%)†	87	83	79	73	73	74	74	76	79	82	86	89	78,3
Gemiddelde atm. luchtdruk op zeeniveau (hPa)†	1017,5	1017,4	1015,7	1014,4	1015,3	1016,6	1016,3	1015,9	1016,4	1015,2	1015,1	1016,5	1016,0
Gemiddelde wind snelheid (m/s)†	4,1	3,8	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,8	3,0	3,4	3,6	3,7	3,4



Figuur 4 - 33: Isothermen voor België, voor (a) winter en (b) zomer, gebaseerd op KMI waarnemingen over de periode 1981-2010 [R4-35]. De locatie van de site is weergegeven met een gele ruit.



Figuur 4 - 34: Isohyeten voor België, gebaseerd op waarnemingen over de periode 1981-2010 [R4-35]. De locatie van de site is weergegeven met een gele ruit.

#### 4.4.2 Huidig klimaat in de Kempen

##### 4.4.2.1 Temperatuur en neerslag

Vergeleken met het gemiddelde klimaat beschreven voor België, heeft de Kempen (en dus de omgeving van de bergingssite) een meer continentaal karakter dan wat verwacht mag worden op deze hoogte en afstand van de zee. Het wordt gekenmerkt door relatief warmere zomers en koudere winters, hetere dagen en koudere nachten, in vergelijking met Ukkel. Zo zijn de gemiddelde maximale/minimale temperaturen meer dan een halve graad warmer/kouder in vergelijking met Ukkel. Dit verschil met de rest van het land kan worden verklaard door de grofkorrelige zanderige bodems. Het zand absorbeert de warmte overdag erg snel, maar tijdens de nacht wordt die warmte ook weer snel afgegeven [R4-36].

Tabel 4 - 22 geeft de maandelijkse neerslag- en temperatuurstatistieken voor het gebied Mol-Dessel voor de periode 1990-2009. De onzekerheid op de jaarlijkse gemiddelde neerslag wordt geschat op  $\pm 10$  mm/a.

##### 4.4.2.2 Luchtdruk en winden

De luchtdruk varieert tussen de 950 en 1050 hPa. Het jaargemiddelde voor de windsnelheid in de regio varieert tussen 2 en 7 m/s en extreme windsnelheden van 23 tot 30 m/s komen slechts eens in de twee jaar voor.

De windroos in Figuur 4 - 35 werd opgesteld op basis van twee series metingen uitgevoerd door het SCK•CEN in de nabijheid van de bergingssite (Tabel 4 - 23; [R4-37]).

**Tabel 4 - 22: Huidige klimaatkarakteristieken voor de bergingssite (Geel KMI (1990-1998), Mol SCK•CEN (1999-2009); neerslag: Geel KMI (1990-04/2005), Mol SCK•CEN (05/2005-2009), bron [R4-38]). † maximum/minimum over een gegeven jaar.**

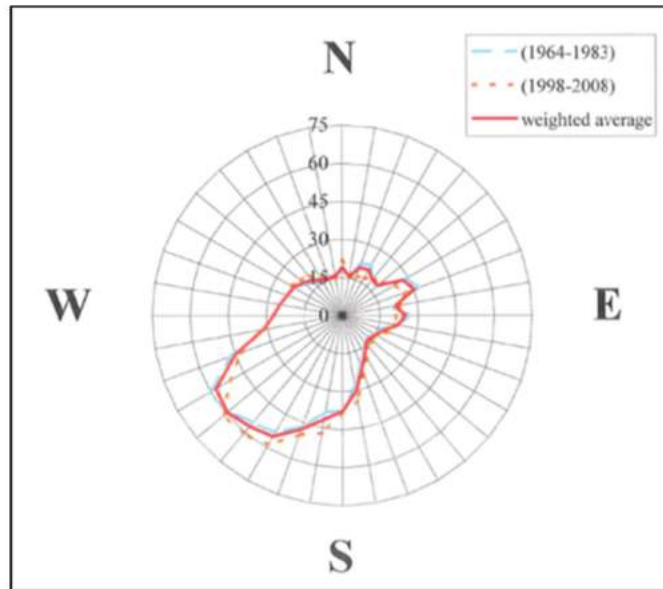
	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jaar
<b>Gemiddelde neerslag (mm)</b>	74,3	71,2	65,2	48,0	58,1	79,2	95,5	74,5	76,5	75,3	84,9	87,5	890,3
<b>Max. neerslag (mm)</b>	159,0	153,5	144,4	132,1	118,6	158,2	192,0	224,3	247,8	184,0	148,1	189,3	1169,4 <sup>†</sup>
<b>Min. neerslag (mm)</b>	5,4	17,2	6,8	0,0	16,0	28,7	36,6	16,6	9,1	15,8	40,0	34,8	616,4 <sup>†</sup>
<b>Gemiddelde temperatuur (°C)</b>	3,6	4,2	6,8	9,9	13,9	16,3	18,3	18,1	14,8	11,0	6,7	3,6	10,6
<b>Gemiddelde max. temperatuur (°C)</b>	5,7	6,7	10,6	14,1	19,1	21,0	23,7	23,8	19,6	15,5	9,6	7,1	14,7
<b>Gemiddelde min. temperatuur (°C)</b>	-0,2	-0,4	2,3	4,1	8,3	11,4	13,4	12,7	9,9	7,0	3,1	1,6	6,1

**Tabel 4 - 23: Jaargegevens met betrekking tot de windrichting.**

Sector	Windrichting	Frequentie [%]	
1	345° - < 15°	N	5,54
2	15° - < 45°	NNE - NE	5,84
3	45° - < 75°	NE - ENE	7,99
4	75° - < 105°	E	6,53
5	105° - < 135°	ESE - SE	4,42
6	135° - < 165°	SE - SSE	7,12
7	165° - < 195°	S	12,90
8	195° - < 225°	SSW - SW	17,41
9	225° - < 255°	SW - WSW	13,63
10	255° - < 285°	W	7,65
11	285° - < 315°	WNW - NW	6,15
12	315° - < 345°	NW - NNW	4,82

Wat betreft windsnelheid en atmosferische stabiliteit zijn er lokaal gegevens beschikbaar van de site SCK voor de periode 2015-2017 [R4-40]. De windsnelheden op een hoogte die overeenkomt met die van de toekomstige tumuli kan lokaal worden afgeleid uit gegevens afkomstig van de site SCK•CEN en opgemeten op een hoogte van 69 m (Tabel 4 - 24 [R4-39]). Om de conversie te kunnen maken van 69 m hoogte naar 24 m hoogte werd de volgende relatie gebruikt:  $u(h1) = u(h2) \cdot (h1/h2)^m$  (met “u” als de snelheid; [R4-40]). De gebruikte m-waarden zijn in Tabel 4 - 25 gegeven. De gemiddelde windsnelheid voor alle Bultynck-Malet stabiliteitscategorieën bedraagt 3,3 m/s. In Tabel 4 - 24 wordt ook de correspondentie tussen de Pasquill stabiliteitsklassen [R4-41] en de Bultynck-Malet [R4-39] stabiliteitsklassen gegeven.





Figuur 4 - 35: De windroos geeft de meest overheersende windrichting weer in de omgeving van Dessel op een hoogte van 24 m (waarnemingsperioden 1964-1983 en 1998-2008). De frequentie is per 1000 (%) weergegeven [R4-37]

Tabel 4 - 24: Atmosferische stabiliteits- en windsnelheidsgegevens op de SCK•CEN-site voor de periode 2015-2017 op een hoogte van 24 m [R4-40]. Omdat er geen Pasquill equivalent bestaat voor de klasse 'sterke wind', wordt hieraan de stabiliteitscategorie 'D' toegekend omdat deze categorie met de hoogste windsnelheden overeenkomt.

Bultynck-Malet stabiliteitscategorie	Beschrijving	Frequentie [%]	Gemiddelde windsnelheid [m/s]	Equivalente Pasquill stabiliteitscategorie
E1	Zeer stabiel	25,9	2,2	G, F
E2	Licht stabiel	34,3	3,5	F, E
E3	Neutraal	18,4	4,6	E, D
E4	Licht onstabiel	13,7	3,6	D
E5	Matig onstabiel	6,4	2,3	C
E6	Zeer onstabiel	0,8	1,6	B, A
E7	Sterke wind	0,6	8,9	'D'
<b>Gemiddelde windsnelheid</b>			<b>3,3</b>	

Tabel 4 - 25: Coëfficiënten gebruikt voor de omrekening van de windsnelheid op 69 m hoogte naar 24 m hoogte [R4-39].

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
0,53	0,40	0,33	0,23	0,16	0,16	0,33

De zes door Pasquill voorgestelde klassen [R4-41] zijn gebaseerd op gegevens van de windsnelheid op 10 m hoogte, de zonnestraling en de bewolgingsgraad. De zonnestraling wordt geschat op basis van de bewolgingsgraad gedurende dag en nacht. Indien de bedekkingsgraad van de hemel niet kan worden

waargenomen (mist), wordt de stabiliteit van de mistlaag beschreven als neutraal, die van de luchtlagen erboven als stabiel.

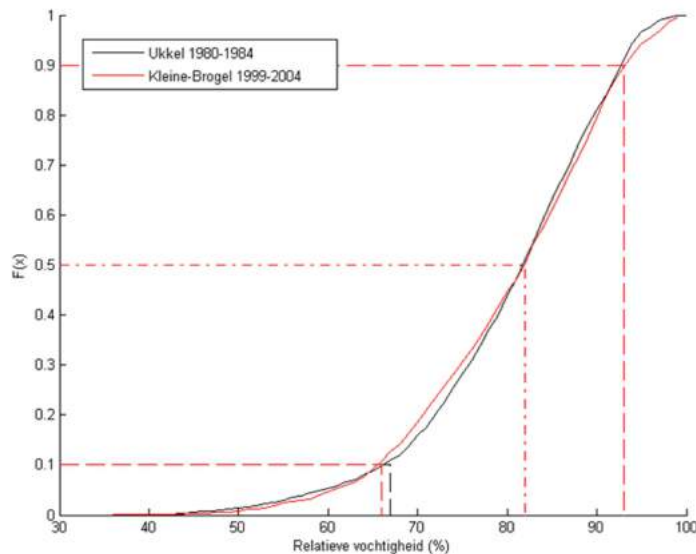
Afhankelijk van de stabiliteitscategorie kunnen verschillende empirisch afgeleide parameters gebruikt worden om de horizontale en verticale dispersiecoëfficiënten van een atmosferisch dispersie model, in dit geval Pasquill of Bultynck-Malet systeem te bepalen [R4-39]. De dispersiecoëfficiënten worden gebruikt om pollutieconcentraties in dispersiepluimen te determineren. Zo zal in een onstabiele atmosfeer de dispersiecoëfficiënt groter zijn waardoor de pollutieconcentratie lager zal zijn maar de verspreiding hoger.

#### 4.4.2.3 Relatieve luchtvochtigheid

De relatieve vochtigheid in de Kempen wordt geschat op basis van waarnemingen van het station te Kleine-Brogel, ongeveer 25 km ten oosten van de bergingssite. De gemiddelde maandwaarden (Tabel 4 - 26) zijn zeer vergelijkbaar met de waarden van het station te Ukkel (zie Tabel 4 - 21). Merk op dat de gemiddelde maandwaarden van Kleine-Brogel in Tabel 4 - 26 slechts over 6 jaar werden berekend. Figuur 4 - 36 geeft de cumulatieve dichtheidsfuncties van 5 en 6 jaar dagwaarnemingen, respectievelijk te Ukkel en Kleine-Brogel. Er lijken iets meer waarnemingen te zijn voor de onderste en bovenste extremen in de Kempen (Klein-Brogel), maar de hypothese van statistisch verschillende populaties werd verworpen door een tweevoudige steekproef volgens de Kolmogorov-Smirnov test. Zo is de kans  $F(x)$  dat de relatieve vochtigheid kleiner of gelijk is aan 67% (Kleine Brogel) of 68% (Ukkel), gelijk aan 0,1.

Tabel 4 - 26: Relatieve vochtigheid op maand- en jaarbasis voor Kleine-Brogel (periode 1999-2004; bron [R4-42]).

	Jan	Feb	Maa	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jaar
Gemiddelde relatieve vochtigheid (%)	87,7	83,6	79,6	72,0	72,8	72,6	76,2	77,4	81,4	84,8	90,0	89,9	80,6



Figuur 4 - 36: Cumulatieve dichtheidsfuncties van de relatieve vochtigheid van dagwaarnemingen in Ukkel en Kleine-Brogel.

#### 4.4.2.4 Evaporatie en transpiratie

Dit onderwerp wordt behandeld in §4.6.2.1.

#### 4.4.2.5 Bodemtemperatuur

Voor zover de effecten van vriezen worden beschouwd, ligt de maximum vriesdiepte in de Kempen op ongeveer 0,50 m onder het maaiveld [R4-43]. Dit is gebaseerd op een tijdserie van 7 jaar (1985-1991).

#### 4.4.2.6 Extreme weersomstandigheden

Extreme neerslaghoeveelheden werden door het KMI geraamd voor de regio Mol – Dessel [R4-44]. Intensiteit-duurtijd-frequentiecurves (IDF-curves) werden specifiek voor Dessel opgesteld ([R4-44]). De daarbij gebruikte methodologie is beschreven in [R4-45]. IDF-curves laten toe om de terugkeerperiode in te schatten van een bepaalde neerslaghoeveelheid (Tabel 4 - 27). Zo wordt er bijvoorbeeld aangetoond dat 215 mm neerslag of meer over een periode D van 30 dagen om de T = 10 jaar kan optreden.

Tijdens de 20<sup>e</sup> eeuw heeft de maximale sneeuwdikte nooit meer dan 35 cm bedragen. Op basis van waarnemingen voor België over de periode 1900 tot 2008 [R4-35] is de frequentie van hagelschade op kleine, lokale schaal ongeveer 1 gebeurtenis per 2 jaar.

**Tabel 4 - 27: IDF relatie voor Dessel, extreme regenvalwaarden (mm) geschat voor een aantal terugkeerperiodes (T) en een aantal duurtijden (D) [R4-44]**

T \ D		T											
		2 m	3 m	6 m	1 a	2 a	5 a	10 a	20 a	30 a	50 a	100 a	200 a
10	min	3,0	4,3	6,4	8,6	10,7	13,5	15,6	17,7	18,9	20,4	22,4	24,4
20	min	4,4	6,0	8,9	11,7	14,5	18,2	20,9	23,6	25,2	27,2	29,9	32,6
30	min	5,3	7,2	10,4	13,6	16,8	21,0	24,1	27,3	29,1	31,3	34,4	37,4
1	uur	6,9	9,2	13,1	16,9	20,7	25,7	29,5	33,2	35,3	38,0	41,7	45,3
2	uren	8,6	11,2	15,6	20,0	24,3	30,0	34,2	38,4	40,9	43,9	48,1	52,2
6	uren	11,3	14,3	19,4	24,4	29,4	35,9	40,8	45,7	48,5	52,1	56,8	61,6
12	uren	13,3	16,6	22,1	27,6	33,0	40,1	45,5	50,8	53,8	57,7	62,9	68,1
1	dag	16,0	19,7	25,8	31,9	38,0	45,9	51,9	57,8	61,2	65,5	71,3	77,1
2	dagen	20,0	24,2	31,4	38,5	45,6	54,8	61,7	68,6	72,6	77,6	84,3	91,0
3	dagen	23,3	28,1	36,1	44,1	52,0	62,3	70,1	77,8	82,3	87,9	95,4	102,9
4	dagen	26,4	31,5	40,4	49,1	57,8	69,1	77,7	86,1	91,0	97,2	105,5	113,7
5	dagen	29,2	34,8	44,3	53,8	63,2	75,5	84,7	93,9	99,2	105,9	114,9	123,8
7	dagen	34,4	40,8	51,7	62,5	73,2	87,3	97,8	108,3	114,4	122,0	132,3	142,5
10	dagen	41,5	49,1	61,8	74,5	87,0	103,5	115,8	128,1	135,2	144,1	156,1	168,0
15	dagen	52,5	61,7	77,3	92,7	108,0	128,1	143,1	158,1	166,7	177,6	192,3	206,8
20	dagen	62,8	73,5	91,6	109,6	127,5	150,9	168,4	185,8	195,9	208,6	225,7	242,7
25	dagen	72,6	84,7	105,3	125,7	146,0	172,5	192,4	212,1	223,6	238,0	257,4	276,6
30	dagen	82,1	95,6	118,5	141,2	163,7	193,3	215,4	237,4	250,1	266,1	287,7	309,1

In België komen af en toe tornado's voor, maar dit zijn zwakke tornado's, die meestal windhozen worden genoemd. Voor windhozen die schade veroorzaken, op basis van waarnemingen over de periode 1982-2010, is de frequentie voor België 3 tot 4 per jaar op basis van een telling bij het KMI. Hun uitgestrektheid is echter beperkt (enkele tientallen tot enkele honderden meter) en ze blijven dus een zeer zeldzame gebeurtenis op lokale

schaal. De meest verwoestende tornado's die in ons land in de 20ste eeuw zijn geregistreerd, zijn deze van Oostmalle (1967) en L'église (1982) waar de windstoten zouden zijn opgelopen tot om en bij de 70 m/s (~250 km/u). De probabiliteit om getroffen te worden door een dergelijke tornado ligt in de grootte orde van  $10^{-7}$  per jaar ([OD-233], Annex 2, §5.3.5).

#### 4.4.2.7 Conclusie

De site is niet onderhevig aan extreme meteorologische omstandigheden die een effect zouden kunnen hebben op factoren zoals vertering of een algemene toenemende instabiliteit van de biosfeer.

### 4.4.3 Klimaatevolutie

#### 4.4.3.1 Verwachte evolutie

Op basis van klimaatmodellering verwacht IPCC tegen 2100 een globale temperatuurstijging in de range van 1,8 °C tot 4 °C (onzekerheidsrange 1,1 °C – 6,4 °C, §4.1 in [OD-077]). Voor Europa zouden de temperaturen sterker toenemen dan het globale gemiddelde, met in Noord-Europa (48° N – 75° N dus met inbegrip van België) vooral een opwarming van de winters. Onder het A1B scenario wordt een temperatuurstijging gesimuleerd tussen 2,3 °C en 5,3 °C [R4-46]. De gesimuleerde temperatuurstijging per seizoen wordt gegeven in Tabel 4 - 28.

**Tabel 4 - 28: Regionaal gemiddelde voor Noord-Europa van temperatuur- en neerslagvoorspellingen op basis van 21 globale modellen onder het A1B scenario. Er worden waarden gegeven voor de minimale en maximale voorspelde respons alsook voor het 25<sup>ste</sup>, 50<sup>ste</sup> en 75<sup>ste</sup> percentiel.**

Seizoen	Temperatuurrepons [°C]					Neerslagrespons [%]				
	min	25	50	75	max	min	25	50	75	max
Winter (DJF)	2,6	3,6	4,3	5,5	8,2	9	13	15	22	25
Lente (MAM)	2,1	2,4	3,1	4,3	5,3	0	8	12	15	21
Zomer (JJA)	1,4	1,9	2,7	3,3	5,0	-21	-5	2	7	16
Herfst (SON)	1,9	2,6	2,9	4,2	5,4	-5	4	8	11	13
Jaar	2,3	2,7	3,2	4,5	5,3	0	6	9	11	16

Ook de jaarlijkse neerslaghoeveelheid zou zeer waarschijnlijk toenemen (0 – 16%) in het grootste deel van Noord-Europa. De grootste toename van de neerslaghoeveelheid wordt verwacht in de winter. In de zomer wordt niet systematisch door alle modellen een toe- of afname gesimuleerd – wel is het zo dat de meeste modellen ten zuiden van 55° N een vermindering in de neerslag verwachten.

Verder zijn er indicaties voor wijzigingen in de windcirculatie, die een invloed zullen hebben op de neerslaghoeveelheden: in de winter wordt een toename van de neerslag verwacht (onder invloed van toenemende westenwinden), in de zomer veelal een afname (meer oostenwinden).

Met uitzondering van de laagste waarden in Tabel 4 - 29 betekenen deze verwachtingen met betrekking tot klimaatverandering een vrij snelle (i.e. tegen het einde van deze eeuw) transitie naar een (subtropische) Cr of –

rekening houdend met het feit dat de modellen ten zuiden van 55° N een afname van de neerslag verwachten in de zomermaanden – Cs klimaattoestand.

De opwarming heeft tot gevolg dat een deel van de ijskappen gaat afsmelten, het zomer zee-ijs aan de poolkappen zal waarschijnlijk verdwijnen tijdens de 2e helft van deze eeuw, en dat een temperatuuroename tot thermische expansie gaat leiden van de oceanen met een zeespiegelstijging tot gevolg. Deze stijging wordt op 0,18 tot 0,59 m geschat tegen 2090.

Ook na het eind van de eeuw wordt verwacht dat de klimaatopwarming zich doorzet; waarbij de temperaturen aan het aardoppervlak zich wel stabiliseren na een tijdschaal van enkele honderden tot duizenden jaren indien de stralingsforcing gestabiliseerd is (zie bijv. §10.7.2 van [R4-46] en §12.5 van [R4-47]).

Coherent met de ontwikkeling van een Cs klimaat in de regio's in Centraal Engeland en Noordoost Frankrijk zoals voorspeld door BIOCLIM op basis van de B3 en B4 scenario's<sup>28</sup> [R4-48], verwachten we dan ook een instandhouding van een dergelijke klimaattoestand, – warmer dan vandaag en met drogere zomers –, gedurende de volledige periode van ongeveer 10 000 jaar.

#### 4.4.3.2 Onzekerheden

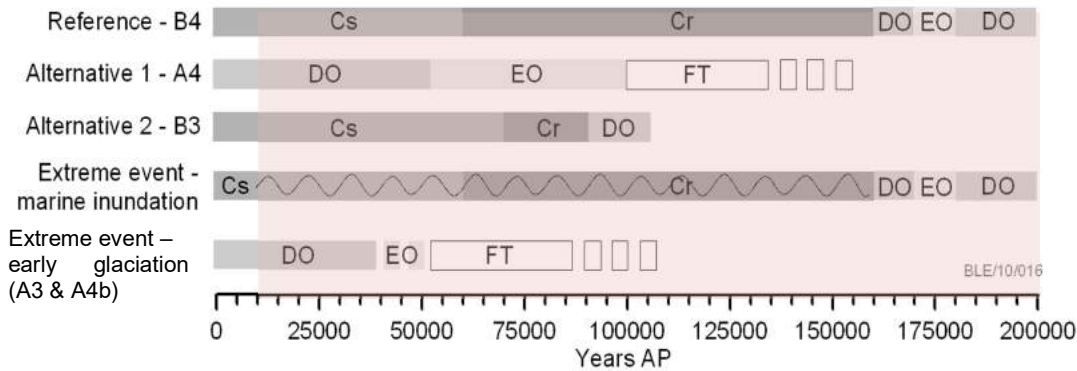
De belangrijkste drijvende krachten voor klimaatsverandering zijn variaties in zonnestraling en broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub> (natuurlijke variaties en verhoogde concentraties door menselijke activiteit). De komende 50 000 jaar worden relatief beperkte variaties in de amplitude van de zonnestraling verwacht [R4-49], waardoor de verhoogde CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer en de lange verblijftijd ervan een grote invloed zullen hebben op het klimaat.

Binnen BIOCLIM worden 15 CO<sub>2</sub>-scenario's voorgesteld, waarvan er enkele naar voren worden geschoven als meest relevant [R4-49]. Dit wordt schematisch samengevat in Figuur 4 - 37:

- In een eerste set simulaties worden enkel natuurlijke variaties in de CO<sub>2</sub>-concentratie beschouwd (A3, A4a en A4b). Onder deze omstandigheden wordt de klimaatevolutie sterk gestuurd door de zonnestraling, maar de CO<sub>2</sub>-concentratie kan de effecten hiervan op de variaties in ijsvolumes versterken dan wel beperken. Uit deze simulaties blijkt dat een klimaattoestand vergelijkbaar met de hedendaagse (DO) gedurende meerdere tienduizenden jaren standhoudt, waarna een afkoeling zich doorzet (zie Figuur 4 - 37).
- In een tweede set simulaties wordt de natuurlijke CO<sub>2</sub>-variatie gecombineerd met verschillende bijdragen door menselijke activiteit (fossiele brandstof, scenario's B1, B3 en B4). Door deze menselijke invloed te beschouwen, wordt een opwarming verwacht in vergelijking met het huidige klimaat, die gedurende meer dan 100 000 jaar standhoudt (Figuur 4 - 37). Hoewel de jaargemiddelde beschikbare hoeveelheid water ongeveer constant zou blijven, worden drogere zomers voorspeld.

---

<sup>28</sup> Natuurlijke CO<sub>2</sub>-variaties en lage dan wel hoge bijdrage van fossiele brandstoffen. Beide scenario's leiden tot een vergelijkbare klimaatevolutie.



**Figuur 4 - 37: Mogelijke klimaatevoluties voor de site van Dessel op basis van BIOCLIM [R4-49]. DO is het huidige gematigde zeeklimaat; Cs en Cr zijn subtropische klimaattypes al dan niet met droge zomers; EO en FT zijn koude toendraklimaten zonder en met permafrost. De relevante tijdschalen voor de evaluatie van de oppervlaktebergingsinrichting in Dessel zijn beperkt tot 10 000 jaar.**

Over de relevante tijdschalen voor de evaluatie van de oppervlaktebergingsinrichting in Dessel worden drie mogelijke klimaattoestanden beschouwd:

- een Cs-klimaat (subtropisch met droge zomers),
- een Cs-klimaat met stijging van de zeespiegel,
- een DO-klimaat.

Er zijn indicaties dat een stijging van de zeespiegel met 20-25 m niet kan worden uitgesloten in de komende 10 000 jaar, hoewel er grote onzekerheden verbonden zijn aan een dergelijk scenario. In dat geval zou de kustlijn opschuiven tot in de buurt van de bergingsinrichting in Dessel.

#### 4.4.3.3 De CCI-HYDR studies

De aanwezige onzekerheden op klimaatsvoorspellingen hebben niet zozeer betrekking op de aard van de klimaattoestand dan wel op de grootte van de temperatuur- en neerslagrespons (Tabel 4 - 29). Om een range van mogelijke klimaatomstandigheden te definiëren op basis van de beschikbare voorspellingen, met bijzondere aandacht voor de temperatuur, neerslaghoeveelheid en verdeling van de neerslag en temperaturen doorheen de seizoenen, wordt gebruikt gemaakt van de CCI-HYDR studies [R4-50]. Hierin worden, op basis van zgn. perturbatiefactoren voor het huidige klimaat, drie scenario's gedefinieerd:

- een 'hoog/nat' scenario met natte winters en droge zomers;
- een 'laag/droog' scenario met droge winters en droge zomers;
- een 'gemiddeld' scenario.

Een 'nat' (of hoog) scenario resulteert in de grootste toename van neerslag tijdens de winter (Figuur 4 - 38). Dit leidt tot een hoog debiet van waterlozingen, hoge rivierwaterstanden, overstromingen, en hoge bodem- en grondwaterniveaus in de winter. Een 'droog' (of laag) scenario wordt gekenmerkt door lage rivierdebieten, lage

bodem- en grondwaterniveaus tijdens droge zomerperioden. In het voorjaar kunnen er iets hogere grondwaterstanden zijn. Een derde (gemiddelde) scenario leidt tot gematigde resultaten, zowel voor hoge en lage rivierdebieten en natte en droge perioden. Het 'gemiddelde' scenario vertegenwoordigt gemiddelde omstandigheden, en vormt in die zin niet noodzakelijk een 'beste schatting' voor de toekomst.

Zelfs onder het 'hoge/natte' scenario neemt de totale neerslaghoeveelheid af in vergelijking met het huidige klimaat. Wel is er onder dat scenario een sterk uitgesproken seizoenseffect met nattere winters en drogere zomers: tijdens de droogste maand (augustus) valt er slechts 18 mm neerslag, wat veel minder is dan in de natste maand (december; 137,5 mm).

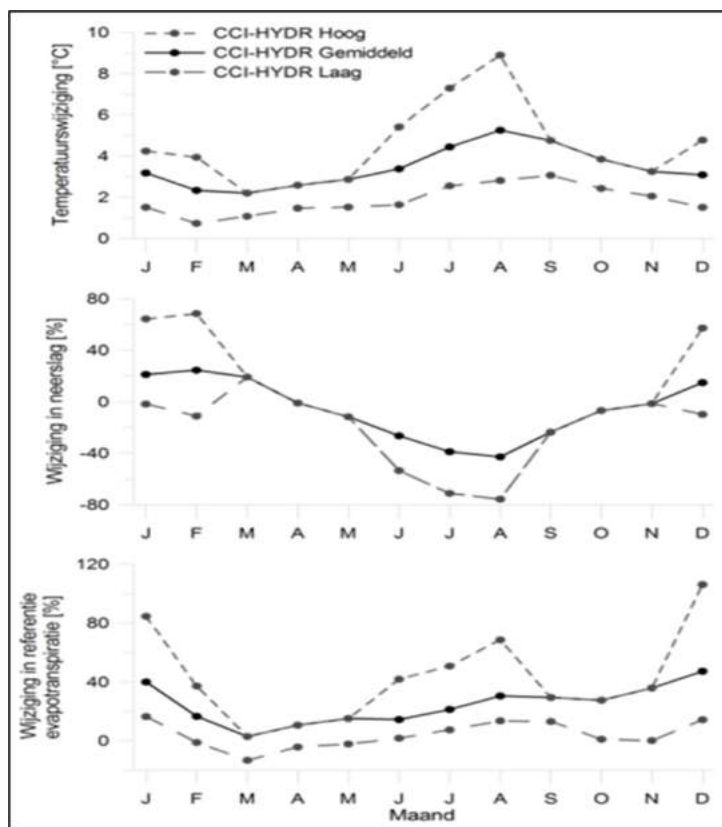
Om tot een range van toekomstige maandelijkse neerslaghoeveelheden in Dessel te komen, werden perturbatiefactoren toegepast op de huidige gemiddelde maandelijkse neerslaghoeveelheden in Dessel (1990-2009). De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4 - 29.

**Tabel 4 - 29: Geprojecteerde maandelijkse neerslaghoeveelheid P [mm/maand] voor Dessel, op basis van waarnemingen voor de periode 1990-2009 en perturbatiefactoren voor de 'lage', 'gemiddelde' en 'hoge' CCI-HYDR scenario's.**

Maand	Neerslag P [mm/maand]			
	Dessel	'Laag / Droog'	'Gemiddeld'	'Hoog / Nat'
1	74,3	72,9	90,0	122,0
2	71,2	63,2	88,6	119,9
3	65,2	77,7	77,7	77,7
4	48	47,5	47,5	47,5
5	58,1	51,2	51,2	51,2
6	79,2	36,8	58,2	36,8
7	95,5	27,5	58,4	27,5
8	74,5	18,0	42,6	18,0
9	76,5	58,4	58,4	58,4
10	75,3	70,1	70,1	70,1
11	84,9	83,6	83,6	83,6
12	87,5	78,9	100,4	137,5
<b>Jaarlijks [mm/a]</b>	<b>890,3</b>	<b>685,9</b>	<b>826,8</b>	<b>850,2</b>

Dezelfde oefening kan gemaakt worden voor de temperatuur (Tabel 4 - 30). Het 'lage' scenario wordt gekenmerkt door meer dan 4 maanden met een temperatuur < 10 °C en stemt dus strikt genomen niet overeen met een 'subtropisch' klimaat, hoewel er ook onder dit scenario een belangrijke opwarming wordt genoteerd. Wel kan het als representatief beschouwd worden voor de mogelijke doch niet verwachte instandhouding van een DO klimaat (zie Figuur 4 - 37).

De 'gemiddelde' en 'hoge' scenario's stemmen wel overeen met de classificatie 'subtropisch'. In het 'gemiddelde' scenario is er geen uitgesproken seizoenseffect van de neerslag (Tabel 4 - 30): het wordt geclassificeerd als een Cr klimaat, terwijl het 'hoge' scenario een Cs klimaat vertegenwoordigt.



Figuur 4 - 38: CCI-HYDR scenario's voor de nabije toekomst (AD 2100).

Tabel 4 - 30: Geprojecteerde maandelijkse temperatuur [°C] voor Dessel, op basis van waarnemingen voor de periode 1990-2009 en perturbatiefactoren voor de 'lage', 'gemiddelde' en 'hoge' CCI-HYDR scenario's.

Maand	Temperatuur T [°C]			
	Dessel	'Laag / Droog'	'Gemiddeld'	'Hoog / Nat'
1	3,6	5,1	6,8	7,8
2	4,2	4,9	6,5	8,1
3	6,8	7,9	9,0	9,0
4	9,9	11,4	12,5	12,5
5	13,9	15,4	16,8	16,8
6	16,3	17,9	19,7	21,7
7	18,3	20,8	22,7	25,6
8	18,1	20,9	23,4	27,0
9	14,8	17,8	19,5	19,5
10	11,0	13,4	14,8	14,8
11	6,7	8,8	10,0	10,0
12	3,6	5,1	6,6	8,3
<b>Jaarlijks [°C]</b>	<b>10,6</b>	<b>12,5</b>	<b>14,0</b>	<b>15,1</b>



## 4.5 Geologie en seismologie

### 4.5.1 Geologisch opbouw van het Kempens Bekken

De sokkel van de Kempen is opgebouwd uit drie geotektonische eenheden, zijnde het Londen-Brabant Massief in het zuidwesten, de Roerdalslenk in het noordoosten en daartussen zacht hellende Varistische gesteenten. Ook stratigrafisch kan de Kempen in drie eenheden opgedeeld worden: een geplooid Caledonische eenheid aan de basis (Londen-Brabant Massief), door normaalbreuken verstoorde Varistische gesteenten en de dekterreinen die het geheel bedekken [R4-36]. De grens tussen de eenheden wordt gemarkeerd door een hoekdiscordantie, die bijvoorbeeld een tijdshiaat van bijna vijftig miljoen jaar omvat tussen de Varistische gesteenten en de dekterreinen.

Periodes waarbij sedimenten werden afgezet wisselen af met korte en langere sedimentatie-onderbrekingen of erosiefasen. Op de Caledonische sokkel werden tijdens het Midden-Devoon conglomeraten en zand afgezet, die de erosieproducten zijn van het zuidelijk gelegen Caledonisch Massief. Deze worden bedekt door ondiep mariene kalkrijke kleien en door fluviatische zanden, beiden van Boven-Devoon ouderdom. Na een korte sedimentatieonderbreking worden tijdens het Boven-Dinantiaan in subtropische omstandigheden carbonaten gevormd. Afhankelijk van de paleogeografie die bepaald wordt door breukwerking, vindt men riffen, lagunaire kalkstenen of open ondiep-mariene kalkstenen. Op het einde van het Viseaan treedt door een algemene regressie ten westen van Turnhout intense karstvorming op. De kalksedimentatie wordt opgevolgd door een siliciklastische sedimentatie tijdens het Silesiaan. Het milieu evolueerde van ondiep mariene condities tijdens het Namuriaan naar een uitgestrekte delta tijdens het Westfaliaan. Dit geeft aanleiding tot de afzetting van een meer dan 2 000 m dikke afwisseling van zanden en fijnkorrelige sedimenten, en steenkoollagen.

Na een sedimentatieonderbreking van 40 miljoen jaar die volgt op de Varistische gebergtevorming, wordt op een transgressief conglomeraat een ondiep mariene kalkrijke klei tijdens het Perm afgezet [R4-51]. De hierop liggende rode conglomeraten en zandstenen van het Buntsandstein, met wat kleirijker sediment aan de basis en top, zijn tot 600 m dik. De top van het Trias is gekenmerkt door ondiep mariene afzettingen: lagunaire kalksteen, kleien en mergels met evaporietlaagjes. De zwarte kalkhoudende kleistenen en grijze kalkstenen van Jura-ouderdom werden afgezet in een diepere zee. Al deze sedimenten zijn van een latere erosie gespaard in het noordoosten van de Kempen door een zich ontwikkelend slenkstelsel, de voorloper van de Roerdalslenk. De oudste Krijtsedimenten zijn van Santoniaan-ouderdom en bestaan uit lagunaire kleien en zand (Figuur 4 - 39). Ze worden enkel in de Limburgse Kempen aangetroffen en vertegenwoordigen het erosieproduct van de geïnverteerde Roerdalslenk. Ze worden bedekt door silten en dunne kleilagen en mergels van het Campaniaan. Op dezelfde tijd worden mergels en 'schrijfkrijt' afgezet in de Antwerpse Kempen. Wanneer de inversiebewegingen uitstierven op het einde van het Maastrichtiaan, werd zuiver krijt over de hele Kempen afgezet.

Het Tertiair in het Bekken van de Kempen vangt aan met sedimenten, ondergebracht in de Houthem Fm (Daniaan), die lithologisch niet te onderscheiden zijn van die van het Maastrichtiaan, maar hun fossielinhoud is echter typisch Tertiair (Figuur 4 - 40). De zuivere kalkzee maakt plaats voor lagunes met aanvoer van puin tijdens het Thanetiaan. In de lagunes worden zwart- en roodgekleurde kleien met lignietresten en fijne brakwaterzanden afgezet (Opplabbeek Fm) met hierop het transgressieve Zand van Orp en de mariene Mergels van Gelinden die tot 80% kalkmateriaal afkomstig van de erosie van het omliggende krijtlandschap bevatten. Na

een kortstondige regressie zet een opnieuw stijgend zeepeil een forse transgressie in, die de Noordzee tot aan Parijs brengt. Aan de bekkenrand vindt men de Tuffeau van Lincet (Haspengouw), dieper in het bekken de vette Klei van Waterschei die bedekt wordt door het kleiïge Silt van Halen. Hierna treedt een continentale fase op die ingedeeld wordt bij de Tienen Fm.

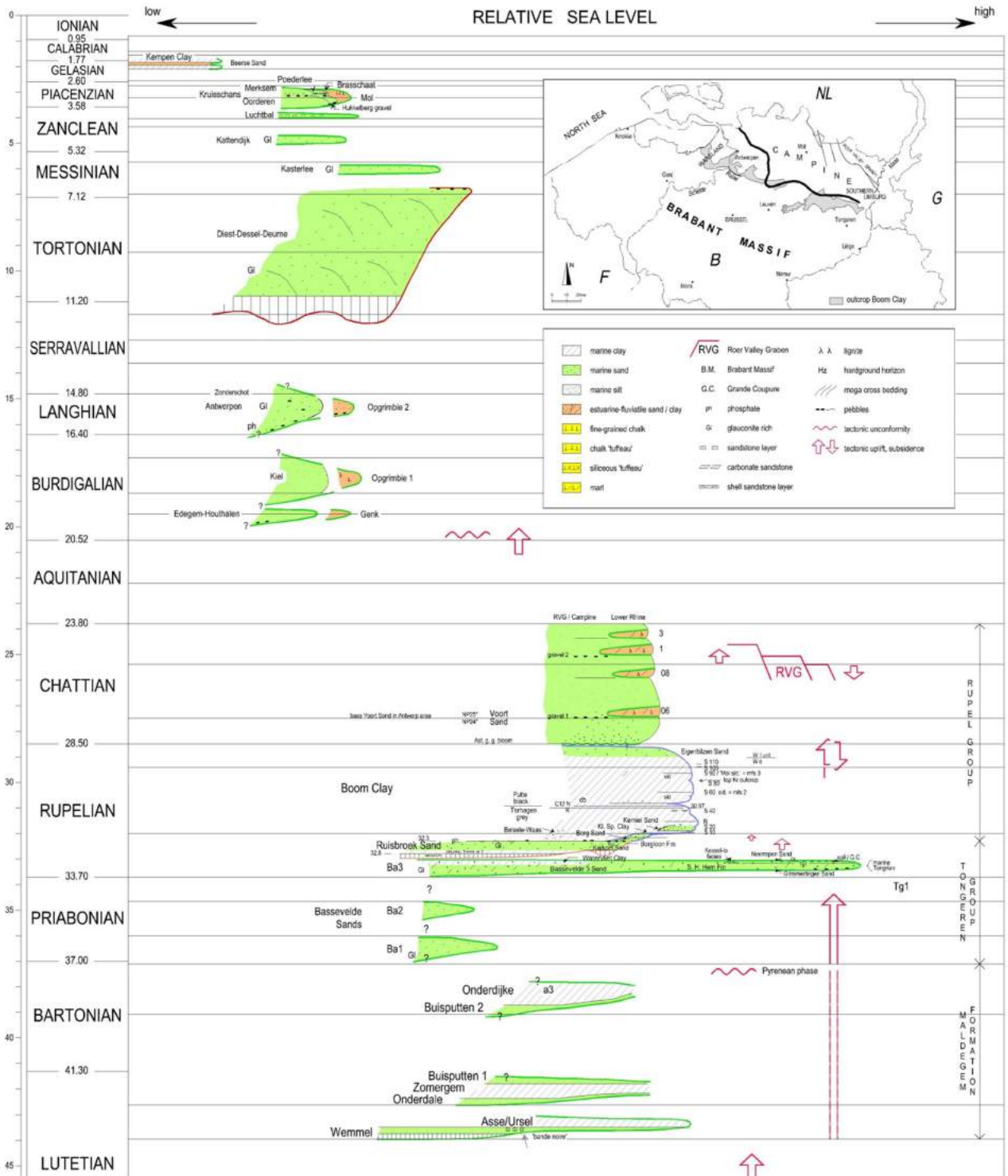
Het Eoceen begint met een opvallende transgressie die de Noordzee niet enkel tot voorbij Parijs brengt, maar die eveneens naar het westen uitdijt tot voorbij Londen. Meer dan 100 m klei wordt afgezet tijdens het Ieperiaan. Oostwaarts, dicht bij de kust, worden de sedimenten zandiger, verder naar de Limburgse Kempen komt geen Ieperiaan meer voor. Het bekken raakt stilaan opgevuld en de sedimenten worden alsmear zandiger tot ze uiteindelijk een continentaal karakter vertonen. Onder invloed van de Pyreneese orogenese wordt de as Weald-Artésië-Ardennen opgetild en langs het laagste punt ervan stroomt warm Atlantisch water naar de Noordzee. Hierdoor wordt een diepe geul uitgeschuurd die opgevuld wordt met grote zandbanken (Brussel Fm, Lutetiaan). De verdere opheffing van Artésië verbreekt de verbinding en in het kalmere water wordt het Zand van Lede afgezet.

Een schommelende zeespiegel veroorzaakt een afwisseling van zanden en kleien (Maldegem Fm). De Noordzee trekt zich stilaan terug waardoor de transgressies steeds minder ver reiken en het bekken opgevuld geraakt.

Aan het begin van het Oligoceen zakt het Rijns Bekken in als gevolg van de eerste pulsen van de Alpiene orogenese, waardoor het afzettingzwaartepunt zich terug meer oostwaarts verplaatst. De Noordzee breidt zich uit tot aan Keulen en overspoelt Ardennen en Condros. Centraal in het bekken wordt nog steeds een afwisseling van zand en klei afgezet (Zelzate Fm: Zanden van Bassevelde en Ruisbroek, Klei van Watervliet). Dicht bij de kust vindt men strandzanden (St. Huibrechts Hern Fm) bedekt door moerasafzettingen gevormd met lagunaire kleien, brakwatermergels en kalkzanden, en estuariene zanden (Borgloon Fm).

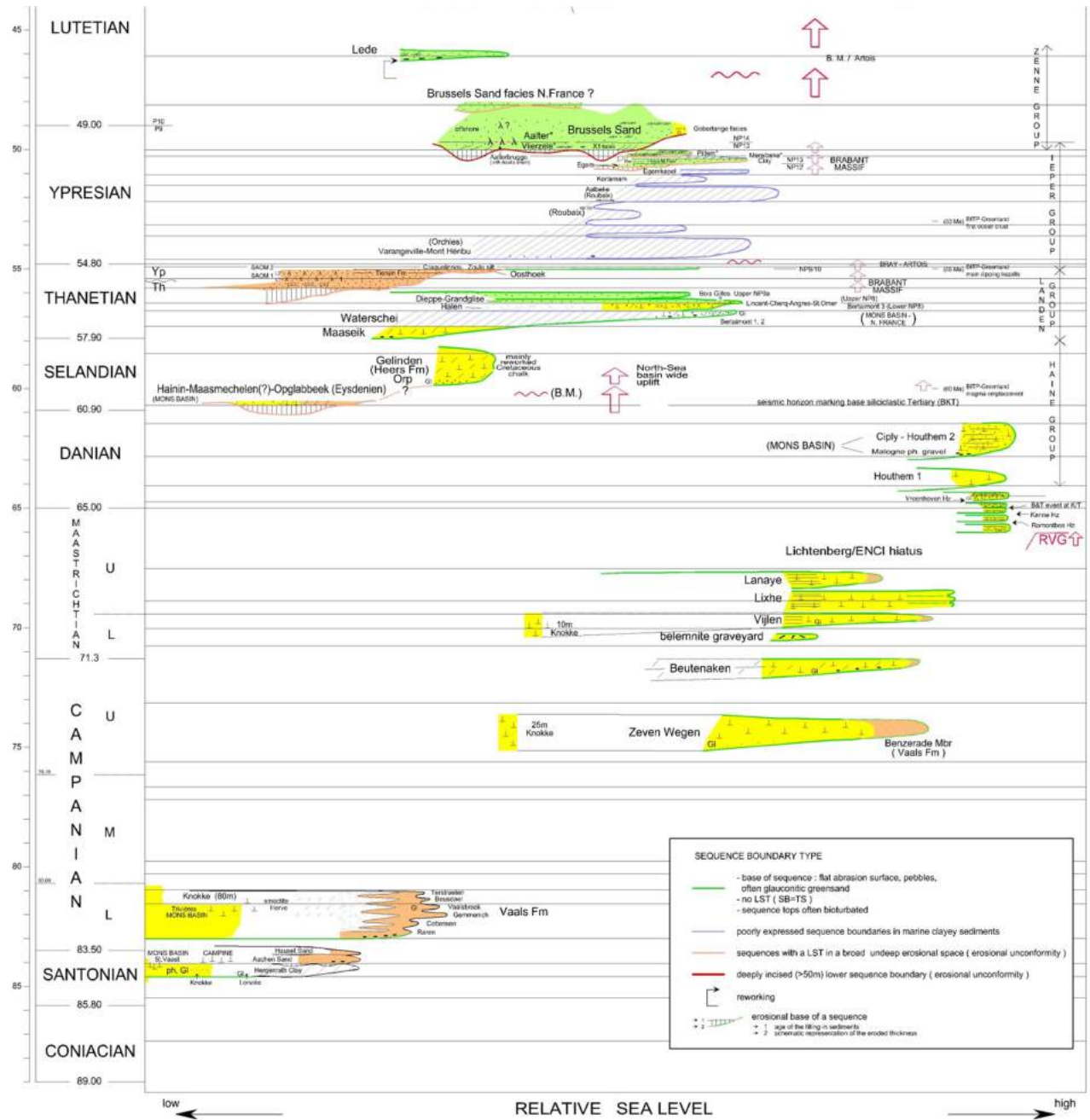
Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel



Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

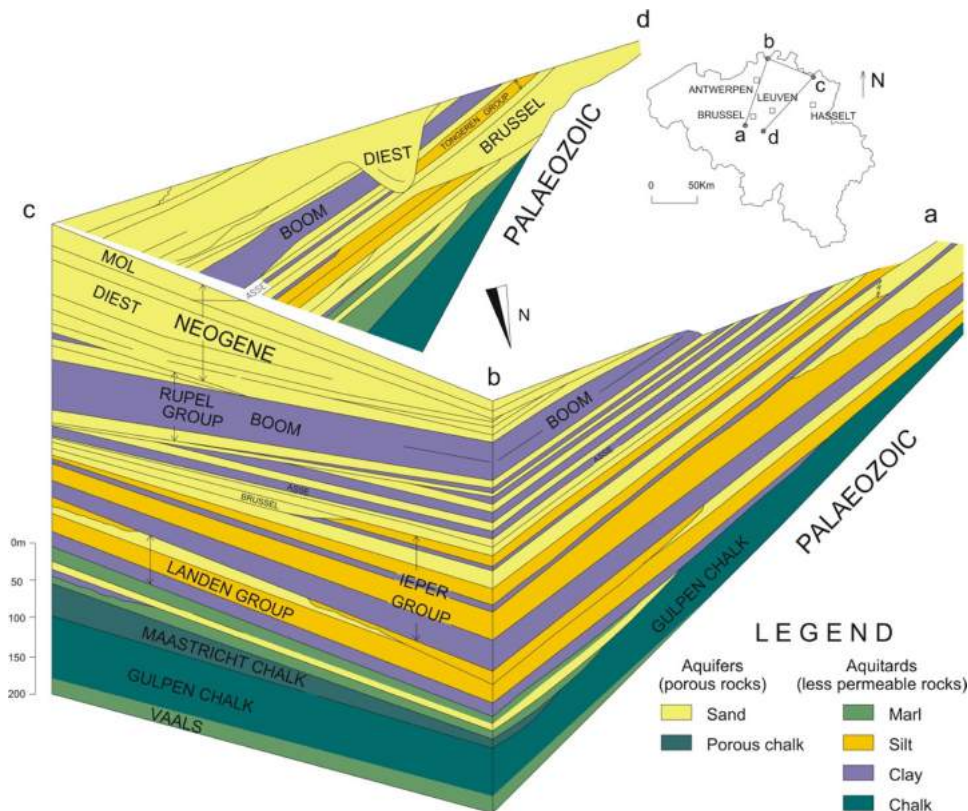


Figuur 4 - 39: Stratigrafische architectuur van het Cenozoïcum en Boven-Mesozoïcum van het zuidelijk deel van het Noordzee Bekken (gemodificeerd naar [R4-52]). Tijdschaal in Ma.

Een nieuwe zeepuls brengt een belangrijke kleisedimentatie teweeg. Centraal in het bekken resulteert dit in de afzetting van de meer dan 100 m dikke Boomse Klei. Het Eigenbilzen Glauconietzand kondigt het ondieper worden van de zee aan en is het begin van een grote regressie.

Na een sedimentatieonderbreking van 3,5 miljoen jaar komt een nieuwe transgressie op gang, deze keer vanuit het noordoosten. De zee bedekt Noord-Duitsland en vult de zakkende slenken op, waaronder de Roerdalslenk. In het noordoosten van de Kempen wordt het Zand van Voort afgezet, in de diepere delen de siltige Klei van Veldhoven.

Het Mioceen-tijdperk is voor ons land overwegend continentaal. Een zee-intrusie die ongeveer drie miljoen jaar duurt, brengt een zandsedimentatie teweeg. In de Limburgse Kempen wordt 50 m Zand van Bolderberg afgezet. Het is een zuiver kleiloos zand, gewassen onder invloed van golven en stromingen in een ondiepe zeegolf. In de Antwerpse Kempen worden ondertussen mariene zanden met een zo hoog gehalte aan glauconiet afgezet, dat ze bijna zwart zijn (Berchem Fm: Zanden van Antwerpen en Kiel). Op het einde van het Mioceen treedt een spectaculaire transgressie op. De Diest Zanden vullen een diepe geul op, en vormen nu de heuvels van het Hageland die zich verder zetten in de heuvels van Zuid-Vlaanderen. Het is een grof glauconiethoudend zand, later meestal tot ijzersteen verweerd, typisch afgezet in schuine gelaagdheden door sterke stromingen.



Figuur 4 - 40: Profielen doorheen het Kempens Bekken vanaf de oppervlakte tot aan het Krijt (gemodificeerd naar [R4-36]).

De Pliocene sedimenten worden in ondiepe mariene omstandigheden afgezet en bepalen de ondergrond ten noorden van de lijn Antwerpen-Herentals-Bree. Het betreft in hoofdzaak glauconiet- en fossielrijke zanden. Tot deze afzettingen behoren de Formaties van Kattendijk en Lillo in het Antwerpse en de Formaties van Kasterlee, Mol en Poederlee in de Noorderkempen. De Zanden van Mol zijn delta-afzettingen van de Maas-Moezel die in de Noorderkempen in de toenmalige Noordzee uitmondde.

#### 4.5.2 De tektonische geschiedenis van de Kempen

Het Kempens Bekken wordt in het noordoosten intens verstoord door een overwegend NNW-SSE georiënteerd complex breukensysteem: de Roerdalslenk of *Roer Valley Graben*.

Reeds gedurende het einde van het Devoon bevindt er zich ten noordoosten van het Londen-Brabant Massief een sedimentair bekken met een toenemende noordoostelijke subsidentie. Uit de studie van de schaarse gegevens kan er besloten worden dat het bekken toen al door grote breuken gecompartmenteerd werd in blokken met differentiële subsidentie. Het huidige breukenpatroon zou trouwens een herwerking kunnen zijn van deze oudere breuksystemen. Tijdens de Vroeg-Kimmerische tektonische fase (220 Ma geleden) kan er al een initiële slenkvorming ontstaan zijn. Hierna volgt het opbreken van het Jura Bekken langs belangrijke noordwest-zuidoost georiënteerde breuken ten gevolg van de Laat-Kimmerische fase (140 Ma geleden). Van toen af werd de Roerdalslenk met zekerheid een structureel element op zich.

Tijdens het Boven-Krijt heeft het oostelijk deel van het Kempens Bekken een intense blokbeweging ondergaan. Tijdens deze periode, en in mindere mate tijdens het Onder-Paleoceen, treedt breukinversie op als gevolg van een veranderend spanningsveld. De vroegere slenkzone gaat relatief stijgen ten opzichte van zijn randzone en wordt een topografisch hoog. Deze inversiebewegingen verzwakken geleidelijk aan gedurende het laatste deel van het Krijt. De grootste bewegingen doen zich voor aan de grote randbreuken van de huidige slenk, op de schollen van Bree en Dilsen en in het centrale deel van de slenk.

Na enkele zwakke inversiebewegingen gedurende het Laat-Thanetiaan (Landeniaan), een waarschijnlijk gevolg van de Laramische tektonische fase (65 Ma jaar geleden), treedt er een relatieve rustige tektonische periode op in de Kempen, met zeer zwakke afschuivende bewegingen. Aan deze rust komt abrupt een einde bij het begin van het Boven-Oligoceen (30 Ma geleden). De grootste verzakkingen komen aan de randen van de slenk voor als gevolg van de Alpiene orogenese. Tijdens het Boven-Oligoceen wordt er tweemaal zoveel sediment in de slenk afgezet als erbuiten. Ditzelfde tektonische beeld blijft gehandhaafd gedurende het Mioceen. De diktetoe name naar de slenk toe is gedurende deze tijd zelfs nog spectaculairder dan tijdens het Boven-Oligoceen. Ook gedurende het Pliocceen en het Quartair blijft de slenk zakken en dit met een subsidentiesnelheid van 4 mm/100 jaar. Dat de grote randbreuken van de slenk nog steeds actief zijn, is te merken aan de verschillende trappen in het reliëf in de omgeving van Bree, Opitter en Neeroeteren.

Uitlopers van de Roerdalslenk worden ver naar het westen teruggevonden. De verschillende breuken ten oosten van Mol tonen dit duidelijk aan. De Breuk van Rauw kent een verplaatsing van 27 m tijdens het Pliocceen, in het Quartair 18 m. Dit komt neer op een gemiddelde van ongeveer 1 m per honderdduizend jaar. De hoge activiteit van de Roerdalslenk tijdens de afgelopen 25 miljoen jaar houdt hoogstwaarschijnlijk verband met het feit dat het huidige spanningsveld, veroorzaakt door de algemene tektonische structuur van Noordwest-Europa, ideaal georiënteerd is ten opzichte van de actieve hoofdbreuken, zijnde de Peelrand in het noorden en de Feldbiss en Rijen in het zuiden, van het slenkstelsel (zie ook Figuur 4 - 45).

Sinds het Tertiair treedt een gestage subsidentie op van het Noordwest-Europese sedimentatiebekken. In het noordwestelijk deel van Nederland is er gedurende het Quartair 600 m sediment afgezet. Dit komt overeen met een gemiddelde subsidentiesnelheid van 0,25 mm/a. De laatste 7 000 jaar bedraagt de subsidentie in Noordwest-Nederland zelfs 0,50 tot 1,00 mm/a. Het Kempens Bekken is eveneens aan subsidentie onderhevig. Metingen tonen aan dat tijdens de laatste twee miljoen jaar, de subsidentie tussen 0,25 tot 0,50 mm/a bedraagt.

### 4.5.3 De geologie rond de site

#### 4.5.3.1 Inleiding

Door het decennialange onderzoek door NIRAS en SCK•CEN in de streek is de geologie er goed gekend, waarbij de kennis enerzijds geconcentreerd is rond de Oligocene Boomse Klei, anderzijds rond de top van het Neogeen en het Quartair.

#### 4.5.3.2 Stratigrafie en Lithologie

##### 4.5.3.2.1 Algemene opbouw van het Cenozoïcum

Een NW-SE georiënteerde geologische sectie met als ankerpunten ON-Dessel-1 en ON-Mol-1 maakt de geologische opbouw, tot bijna aan het Krijt, onder de bergingsite duidelijk (Figuur 4 - 41). Vooreerst toont de sectie dat de lagen een zeer lichte helling vertonen naar het noorden toe: overeenkomende formaties bevinden zich iets dieper in ON-Dessel-1 dan in ON-Mol-1. Tijdens het boren zal men, tijdens de ongeveer eerste 175 m, een dik pakket zanden aantreffen. Alleen al de kleur verraadt dat dit geen homogeen pakket betreft: achtereenvolgens zal men bleekwitte, groenige, roestbruine, donkergroen tot zwarte, en grijsgroene zandige sedimenten naar boven halen. De kleur wordt bepaald door de hoeveelheid glauconiet dat aanwezig is in het sediment. Het bleekwitte Mol zand bevat er geen, het bijna zwarte Berchem zand tot 85 %. De drie eerste formaties, Mol, Kasterlee en Diest worden verder meer in detail besproken (§4.5.3.2.2).

Vanaf de Voort Fm. wordt het sediment kleirijker: de Eigenbilzen Fm kan niet meer als een aquifer worden beschouwd. Deze trend zet zich door in het Lid van Boeretang (vroeger ook 'overgangszone' of '10WIG' zone genoemd) dat tot de Boom Fm. behoort: de resistiviteitscurve toont een duidelijke afwisseling van zandige siltlagen (hogere waarden) met siltige kleilagen (lagere waarden). De Leden van Putte en Terhagen vormen het kleirijkste deel van de Boomse Klei. Het basislid van de formatie, Belsele-Waas is grover en opgebouwd uit siltige zanden en zandige silten.

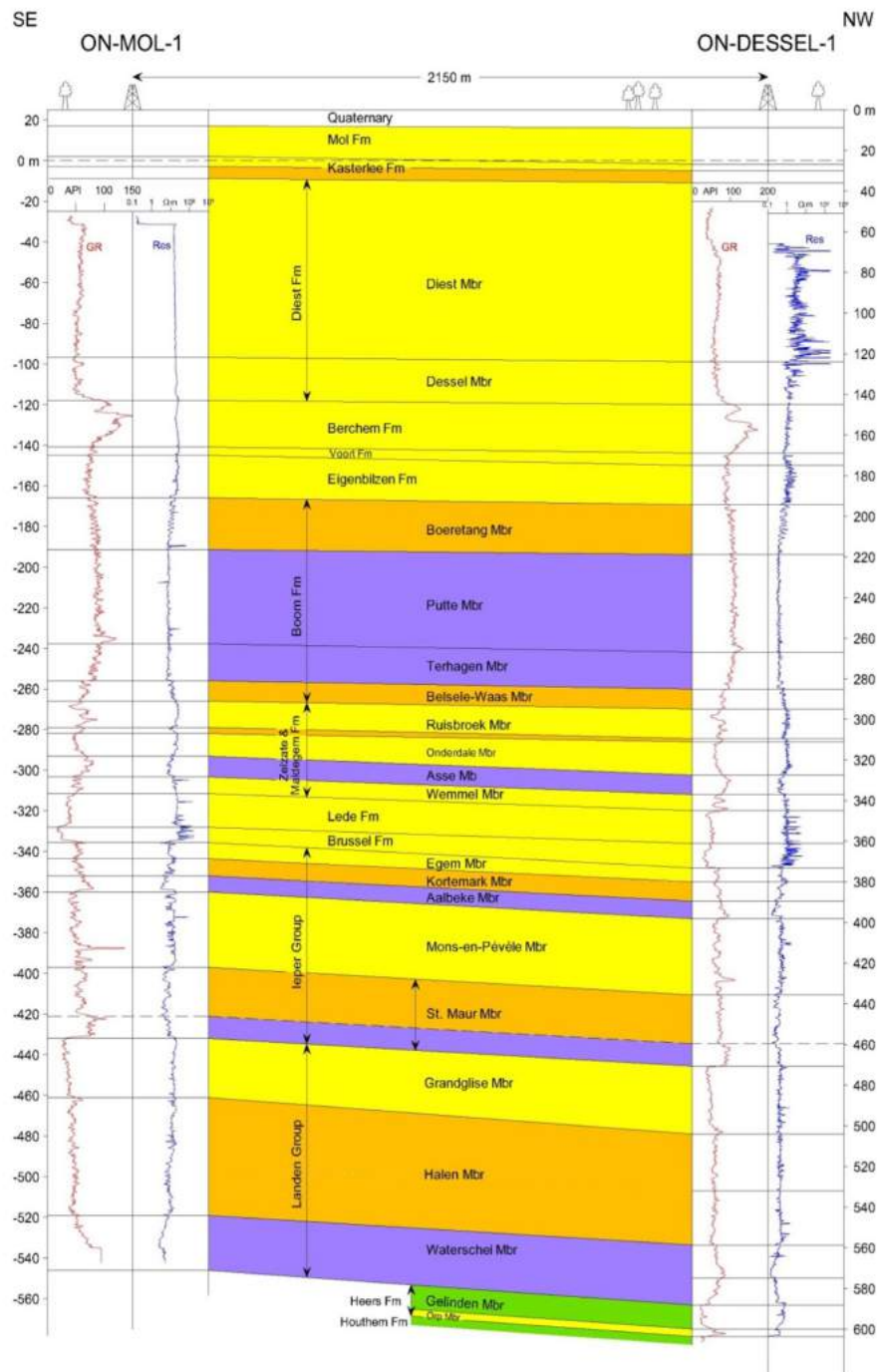
Hieronder treft men een afwisseling van fijne kleihoudende zanden en kleien aan, die tot de Fms. van Zelzate en Maldegem behoren. In de ondergrond van de bergingsite treft men met zekerheid het zand van Ruisbroek, de zeer dunne klei van Zomergem, het zand van Onderdale en de Asse Klei die er 10 m dik is. Ook het zand van Wemmel behoort nog tot de Maldegem Fm, maar het vormt met de onderliggende zanden van Lede en Brussel één aquifer.

De Ieper Groep is algemeen genomen vrij zandig in de streek. Enkel de leden van Orchies (of St. Maur) en Aalbeke zijn er kleirijk. Ertussen treft men het Lid van Mons-en-Pévèle aan dat het zandige equivalent is van de Silt van Roubaix (of Moen) dat meer westwaarts en in het ontsluitingsgebied voorkomt. Boven de Aalbeke Klei komen nog een kleine 10 m siltige sedimenten voor van het Lid van Kortemark.

De daarop volgende Landen Groep is opgebouwd uit een 115 m dik pakket zanden (Leden van Grandglise en Halen) gevolgd door de Waterschei Klei (ongeveer 25 m).

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel



Figuur 4 - 41: Zuidoost– Noordwest georiënteerd geologisch profiel doorheen de omgeving van de bergingsite tussen de boringen ON-Mol-1 en ON-Dessel-1 (op basis van de interpretatie in [R4-53]). Zandige sedimenten zijn in het geel aangegeven, siltige in oranje en kleirijke in het paars. Groen zijn mergels/krijt afzettingen. Locatie van de boringen in Figuur 4 - 42. Linkse diepteschaal in TAW, rechtse diepteschaal in meters onder maaiveld.

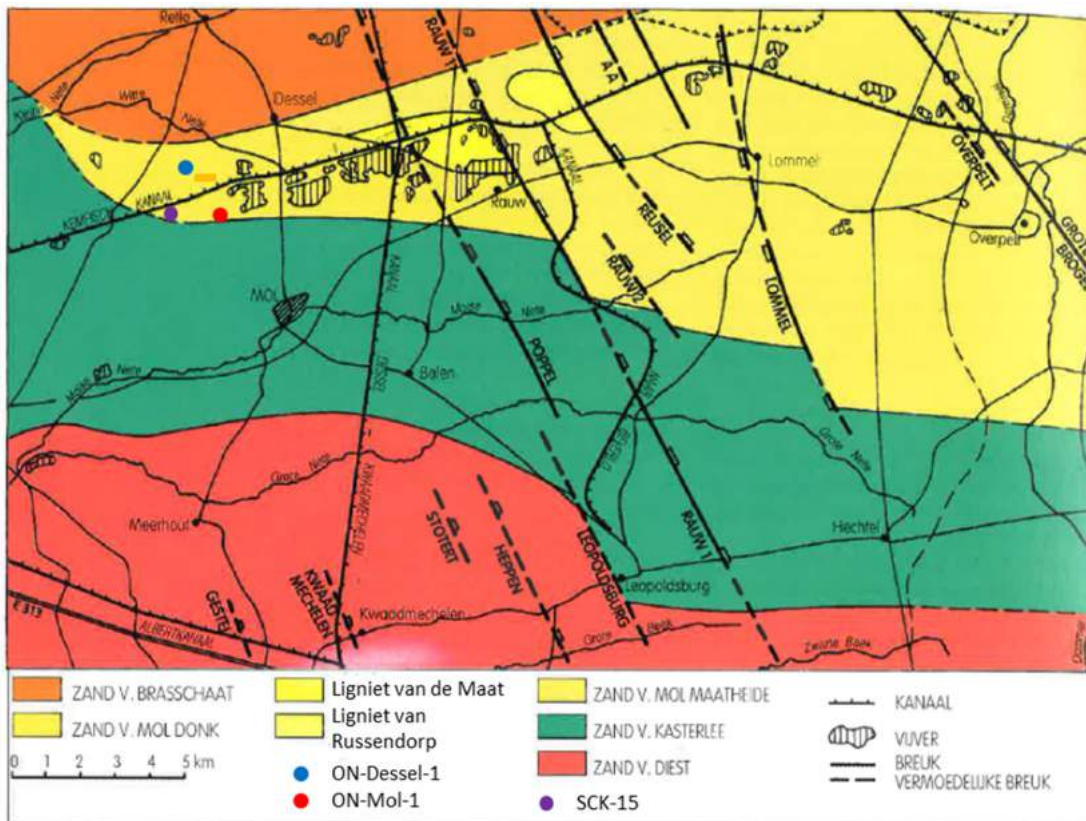


Dieper neemt het kalkgehalte van de sedimenten toe. De Heers Fm. is opgebouwd uit overwegend mergels (Lid van Gelinden) en wat zand (Lid van Orp), de Houthem Fm. kan op basis van de lithologie niet worden onderscheiden van het daaronderliggende Krijt.

#### 4.5.3.2.2 De ondiepe Geologie: het Neogeen

In het gebied rond de bergingsite dagzomen onder een dunne Quartaire laag enkel zeer recente afzettingen van Plioceen ouderdom, zoals de Fm. van Mol en de Fm. van Kasterlee, en de Pleistocene Fm. van Brasschaat (Figuur 4 - 42).

De uitgebreide sondeercampagnes van de terreinverkenningen van 2008 en 2010 laten, door correlatie met de gekernde en gelogde boringen van deze terreinverkenningen, een gedetailleerde kartering van de verschillende grondlagen tot het bovenste deel van de Diest Formatie toe (Figuur 4 - 43). Uit de detailstudie van de CPT's<sup>29</sup> blijkt de zeer goede overeenkomst qua diepte, dikte en lithologie met de boringen ([R4-54], §4.3 in [R4-219]).



Figuur 4 - 42: Geologie van het kaartblad Mol, met locatie van de verkenningsboringen ON-Dessel-1, ON-Mol-1 en 'SCK-15' (bergingsite: oranje rechthoek).

<sup>29</sup> "Cone Penetration Test" of diepsondering

De afzettingen van de Diest Fm. werden voorafgegaan door een diepe erosie van getijdenstromingen. De kernen van deze geulen werden aanvankelijk opgevuld met donkergroen, glauconiet- en kalkrijke, goed gesorteerde zanden van het Lid van Dessel. Hierop volgen de typische groene, glauconiethoudende grove zanden van Diest. De resultaten van de terreinverkenningen leiden in de top van de formatie tot een tweedeling met bovenaan een duidelijk kleirijkere zone. Deze kleirijkere zone wordt herkend in zowel de resultaten van de granulometrische analyses, in de geofysische boorgatmetingen en zelfs in de CPT-respons (lager wrijvingsgetal) in het geval dat de sonderingen een voldoende diepte bereiken.

De sedimenten tot en met de Diest Fm. hebben een duidelijk mariene oorsprong. Het hoge glauconietgehalte en de typische microfossielenfauna getuigen hiervan.

De recentere Neogeen sedimenten die in het gebied voorkomen vertonen een verschuiving naar kustnabije, estuariene en continentale afzettingmilieus door een geleidelijke daling van het zeeniveau en gekenmerkt door sedimentatiehiaten. Dit is gebleken uit studies op basis van dinoflagellaten afkomstig van monsters van onder andere boring ON-Dessel-2 [R4-55]. Ook het glauconietgehalte neemt drastisch af.

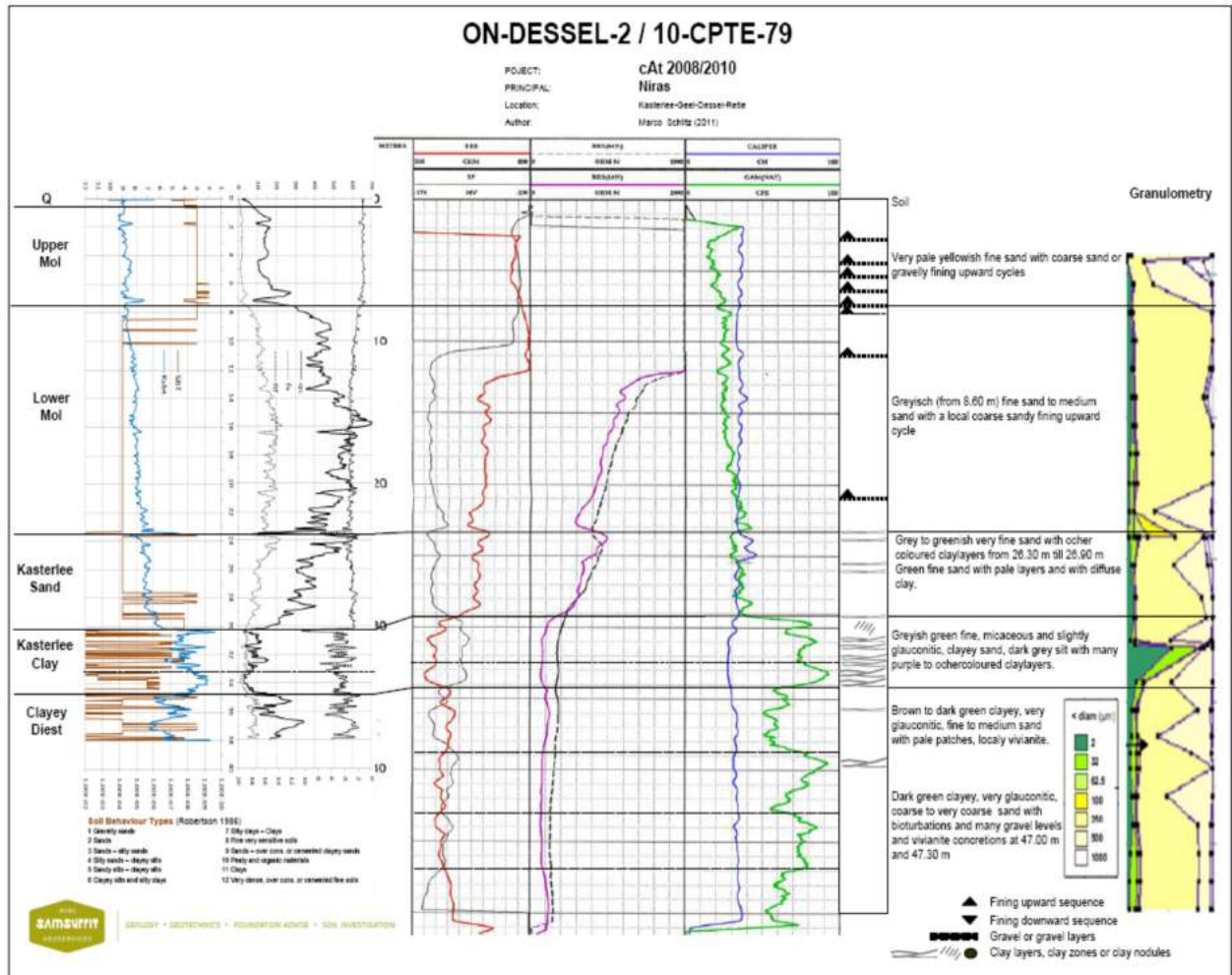
Een eerste kenmerkende laag betreft de Kasterlee Klei, die omwille van zijn duidelijke lithologie een herkenbare boorlog- en CPT-respons vertoont. Deze respons is voornamelijk bovenaan uitgesproken, waar de grens met het Kasterlee Zand zeer duidelijk is. In boorlogs komt dit overeen met een scherpe stijging van de gamma-log en daling van de resistiviteit in de klei. Zowel klei als zand behoren tot de Kasterlee Fm. [R4-55]. Hoewel de ondergrens met de Formatie van Diest minder duidelijk is, wijzen de plaatselijke waarneming van grindjes, het hoge aantal herwerkte microfossielen en lage aantallen *in situ* mariene palynomorfen aan de basis, op een erosief en discordant contact.

De Kasterlee Klei bestaat uit een afwisseling van grijsgroene, matig tot licht glauconiethoudende, slecht gesorteerde zandlenzen en kleilenzen die soms paarskleurig zijn. Het Kasterlee Zand betreft grijsgroen, micahoudend, licht glauconiethoudend, goed gesorteerd fijn zand met plaatselijk een kleilensje.

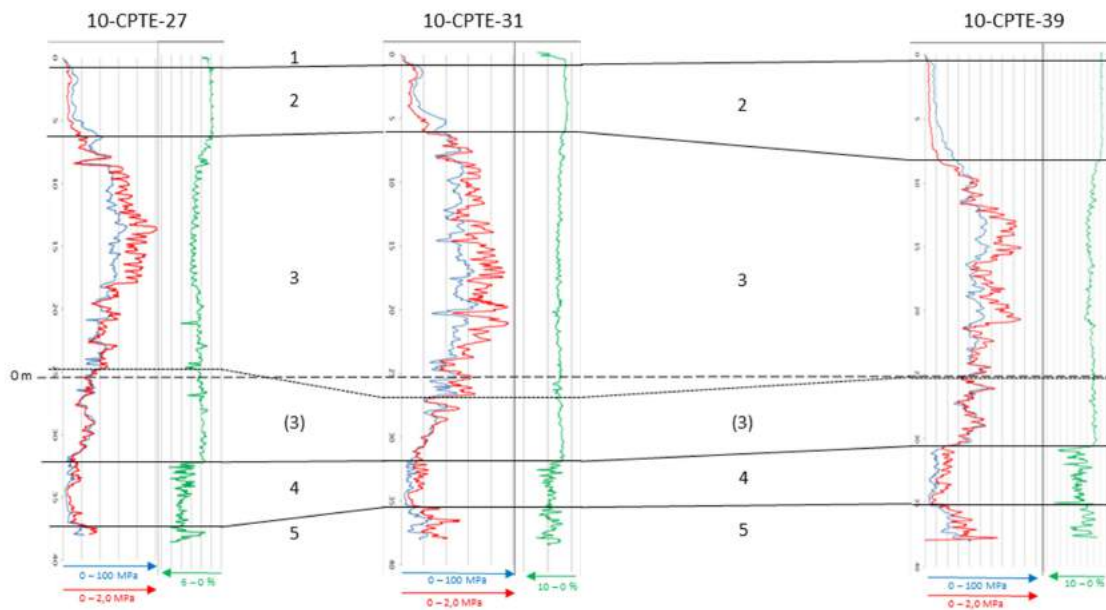
De grenzen en de stratigrafische relatie tussen het Kasterlee Zand en de zanden van de erboven voorkomende geologische formaties zijn moeilijk op basis van zuiver lithologische kenmerken eenduidig vast te leggen. Dit is het gevolg van de toenemende continentale invloed van het sedimentatiemilieu. Uitgaande van de Geologische Kaart van Vlaanderen behoren de bovenste grondlagen in het NE gedeelte van het onderzochte gebied tot de Mol Fm. (in het uiterste N mogelijk zelfs de Brasschaat Fm.). Nabij de NW grens, in de heuvelrug van Kasterlee komt de Formatie van Poederlee voor. Op basis van de boringen en CPT's van de terreinverkenningen zou de Poederlee Fm., geometrisch gezien boven de Mol Fm. of ermee equivalent zijn. Op basis van de kenmerken in de geofysische boorgatmetingen is een onderscheid gemaakt tussen het noordwestelijk deel enerzijds en het centrale en noordoostelijk deel (geplande bergingsite) van het onderzoeksgebied anderzijds.

In de regio van de bergingsite wordt het Kasterlee Zand bedekt door de Mol Fm (Figuur 4 - 43 en Figuur 4 - 44). Deze laatste wordt hier op basis van lithologische kenmerken en boorlog- en CPT-respons opgedeeld in twee delen (naar analogie met [R4-56]). Het onderste Mol Zand (of Onder-Mol) bestaat uit grijze tot bleekgroene fijne zanden maar vertoont een belangrijke fractie > 500 µm ten opzichte van het Kasterlee Zand. Het bovenste Mol Zand (of Boven-Mol) bestaat uit wit tot bleekgrijs, matig tot goed gesorteerd, middelmatig tot grof kwartszand met grindniveau's. Het onderscheid tussen beide eenheden kan dikwijls gemaakt worden op basis van de boorlog- en CPT-respons.

Ten W en NW van de bergingsite zijn de sedimenten boven het Onder-Mol gekenmerkt door lichtgroen middelmatig zand (minder grof dan het typische Boven-Mol) met witte gedeelten (zoals het Boven-Mol zand) en soms basisgrindjes. Deze zanden zijn als MI-Pd-Bs zand gedefinieerd omwille van de onderscheidende kenmerken met het laterale Boven-Mol zand en de nabijheid van de Poederlee Fm. in het noordwesten (Kasterlee) en de Brasschaat Fm. in het noorden (Retie).



Figuur 4 - 43: Beschrijving en kenmerken van boring ON-Dessel-2 en correlatie met 10-CPTE-79; Het eerste paneel geeft het 'soil behaviour type' volgens [R4-57] weer in het bruin en de daaruit afgeleide doorlatendheidscoëfficiënt (blauw); in het tweede paneel zijn de CPT gegevens opgenomen (conusweerstand qc (dikkere lijn), wrijvingsweerstand fs (dunne lijn), en het wrijvingsgetal Rf (rechtter curve)). In het midden zijn de diverse boorgatmetingen afgebeeld: caliper (blauw), Gamma Ray (groen), Short Normal & Long Normal elektrische weerstand (paars & zwart), Resistiviteit (rood) en Spontaneous Potential (zwart), met aan de rechterzijde de lithologie en boorbekrijving. Helemaal rechts zijn de granulometrische analyses opgenomen. Locatie van ON-Dessel-2 in Figuur 4 - 44.



Figuur 4 - 44: Geologisch profiel doorheen de oostelijke tumulus op basis van CPT's: 1: Quartair; 2: Boven-Mol; 3: Onder-Mol & (3) Kasterlee Zand ; 4 : Kasterlee Klei en 5 : Diest Fm. Blauw: conusweerstand; rood: wrijvingsweerstand; groen: wrijvingsgetal. Rode driehoeken duiden de locatie aan van de CPT's, GT-01 en GT-02 zijn de geotechnische boringen.

De interpretaties van de beschikbare boor- en CPT-gegevens laten op het ogenblik geen definitieve conclusies toe wat betreft de exacte stratigrafische positie van deze zanden (Figuur 4 - 44; Tabel 4 - 31). Op basis van bestaande boringen en CPT's in de heuvelrug van Kasterlee, waar de bovenste grondlagen tot de Poederlee Fm. gerekend worden, zou deze laag geometrisch gezien, equivalent of zelfs jonger zijn dan Boven-Mol. Of dit wijst op een laterale overgang tussen het Boven-Mol zand en het Poederlee Zand of op een sedimentaire wig tussen beide is op het ogenblik niet duidelijk.

Tabel 4 - 31: Chrono- en lithostratigrafie. Linker deel gebaseerd op kaartblad 17 [R4-58] en paleontologische gegevens uit ON-Dessel-2 [R4-59]. De gearceerde zones geven periodes van erosie of sedimentatie-onderbreking weer. Het rechterdeel geeft het verband weer tussen de stratigrafische nomenclatuur gebruikt in de verschillende studies op basis van de verkenningscampagnes van 2008 en 2010: (1) hydrostratigrafische interpretatie door SCK•CEN, (2); geotechnische interpretatie van de CPT's op de nucleaire site door Technum-Tractebel (3); geologische interpretatie d.m.v. CPT's van het hele onderzoeksgebied door Samsuffit Geoservices (cijfers komen overeen met de eenheden zoals in Figuur 4 - 44).

Time (Ma)	Period	Epoch	Lithostratigraphic Formation (geological map)		Stratigraphic denominations based on site investigations 2008 and 2010				
			W	E	Hydrostratigraphic interpretation boreholes (1)		Geotechnical interpretation (nuclear site) (2)	Lithostratigraphic interpretation CPT's (3)	
					N-NW	Center-E			
0.01	Quaternary	Holoceen			Quaternary Sands		QS	1	
0.1		Pleistocene	Late						
0.8			Middle						
2.4	Neogene	Pliocene	Early	Brasschaat Fm.	Mol-Poederlee-Brasschaat Sands	Upper Mol Sands	MS	2p	2
2.7			Late	Poederlee Fm.				Mol Fm.	BS1
3.2			Early			Lower Mol Sands	BS	BS2	3?
5.7		Miocene	Late	Kasterlee Fm.	Kasterlee Sands	TL	TL1	3, 374	
7.5					Kasterlee Clays		TL2	4	
9.0				Middle	Diest Fm.	Clayey Diest	DS	5	5?
10.5	Diest Sands	5							
16.0	Dessel Sands								
20.0	Early	Berchem Fm.	Berchem Sands						
25.0	Paleocene	Oligocene	Late	Voort Fm.	Voort Sands				
26.5			Early	Eigenbilzen Fm.	Voort/Eigenbilzen Sands				
30.0				Boom Fm.	Boom Transition zone				

### 4.5.3.3 Structurele Geologie

#### 4.5.3.3.1 Breuken in de nabijheid van de bergingssite

Het overheersende structurele element in de Kempen is de Roerdalslenk. De geologische kaart toont enkele kilometers ten oosten van de bergingssite de aanwezigheid van een aantal breuken, die al dan niet tot aan de oppervlakte zouden doorlopen (Figuur 4 - 42, [R4-58]). Het betreft meer bepaald de breuken van Poppel, Rauw 1, Reusel, Lommel en in de uiterste noordoostelijke hoek van het kaartblad de breuk van Grote Brogel. De meest nabije breuk, de Poppel breuk, zou op ongeveer 6 km van de bergingssite gelegen zijn, die van Rauw op 8 km.

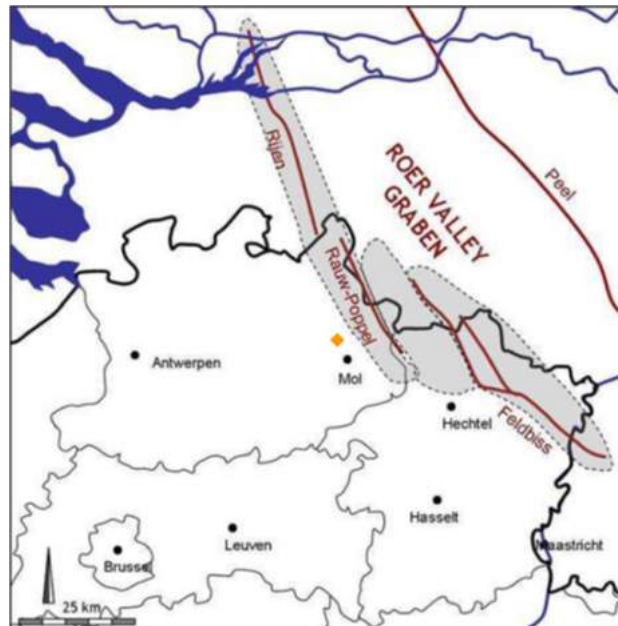
Verder wordt er eveneens in bepaalde publicaties melding gemaakt van de 'Beringen Breuk' of 'breuk X' die ten oosten van de site zou lopen. Deze breuk is goed gekend in het gebied van de steenkoolconcessies tot ten zuidoosten van Hasselt, waar deze gedurende het Tertiair werd gereactiveerd en op bepaalde plaatsen zelfs zou dagzomen. De noordelijke extensie van de breuk zou tot in Nederland lopen, waarbij het speculatieve aspect van de aanwezigheid ervan bij sommige auteurs specifiek wordt aangeduid. Twee studies werden aan de al dan niet bestaande noordelijke extensie van deze breuk in het Tertiair gewijd: de eerste is gedocumenteerd in een ON-nota [R4-60], de tweede studie betreft een algemene evaluatie van de activiteit van de Roerdalslenk [R4-61].

Beiden studies tonen aan dat er geen aanwijzingen zijn van de aanwezigheid van deze breuk in het Neogeen, en dit in de omgeving van de bergingssite. In [R4-60] is getracht om de oorsprong van de noordelijke extensie van de Beringen breuk en zijn aansluiting met de Rijen breuk te achterhalen. Hieruit blijkt dat de eerste vermelding ervan in [R4-62] op een fout berust, die achteraf door andere auteurs werd overgenomen.

#### 4.5.3.3.2 De actieve breuken van de Roerdalslenk

De studie [R4-61] geeft ook een stand van zaken met betrekking tot de tektonische geschiedenis van Roerdalslenk met speciale aandacht voor de identificatie van 'actieve breuken'. Hiervoor werd een inventaris en een evaluatie gemaakt van de breuksystemen die in de literatuur vermeld worden. Het wordt aangevuld met een studie op basis van een digitaal hoogtemodel (DTM) en de interpretatie van geofysische gegevens (boringen en seismische campagnes).

De activiteit van de Roerdalslenk sinds de laatste 25 miljoen jaar heeft vooral betrekking op de drie slenkbegeuzende hoofdbreuken: de Peelrand als noordelijke randbreuk, en de Feldebiss en Rijen als zuidelijke randbreuken. Tussen beide laatste tekent zich een vage transferzone af, waar het breuksysteem van Rauw-Poppel het overheersende actieve element is (Figuur 4 - 45). De Peel breuk zou tussen 70 mm/ka en 100 mm/ka bewegen, de Feldebiss tussen 40 en 70 mm/ka. De langetermijn gemiddelde beweging voor de Rauw breuk wordt geschat op 3 mm/ka, met slapende periodes zonder beweging die afgewisseld worden met periodes met bewegingen tot 24 mm/ka (zie ook §4.5.3.3.3).

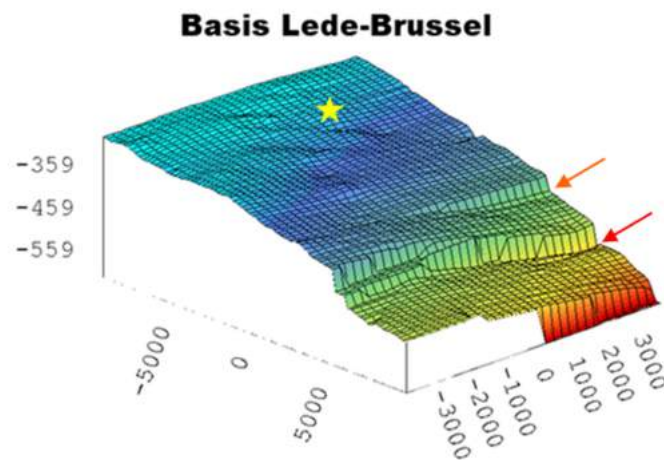


Figuur 4 - 45: De actieve breuken van de Roerdalslenk: de Peel vormt de noordrand, de Feldebiss en de Rijen de zuidrand. De Rauw- en Poppelbreuk zijn de voornaamste breuken in de transferzone tussen de Feldebiss en Rijen [R4-61]. Locatie van de site is aangeduid met een gele ruit.

De DTM analyse bestrijkt het noordelijk deel van de provincies Antwerpen en Limburg. Recent actieve breuken zullen door hun werking een lineament (rechtlijnig hoogteverschil) vertonen aan het aardoppervlak. Door de hogere resolutie van het DTM kunnen subtiele lineamenten beter worden opgemerkt dan via de digitalisatie van topografische kaarten, zoals enkele jaren eerder uitgevoerd in het kader van het paleoseismisch onderzoek ([R4-63], zie ook §4.5.3.3.3). In de omgeving van de bergingssite kon geen lineament worden vastgesteld.

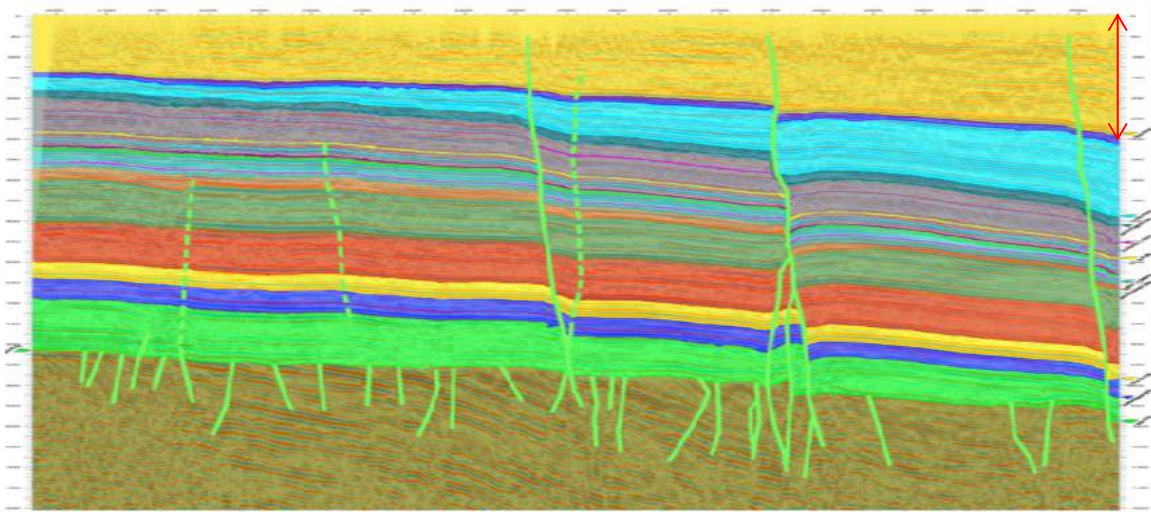
Op basis van boringen en hun stratigrafische interpretatie aan de hand van geofysische boorgatmetingen wordt een duidelijke sprong aangetoond tussen de boringen Dessel-Diel (archiefnr. 31E337) en Lommel (archiefnr. 31E341) ter hoogte van het Neogeen en dieper [R4-64]. De breuk situeert zich op ongeveer 9 km ten oosten van de bergingssite, het betreft dus de breuk van Rauw (Figuur 4 - 46). Tussen de boringen in de directe omgeving van de bergingssite, zijnde de SCK-15, ON-Dessel-1 en ON-Mol-1 (locatie zie Figuur 4 - 42) worden over het gehele Tertiair geen abnormale spronghoogtes of diktevariëaties waargenomen.

De seismische campagne 96-ON bestaande uit negen min of meer E-W georiënteerde lijnen (seismische profielen) verbonden met 4 N-S lijnen, bestrijkt zeer volledig het gebied rond de site. Bijkomend bestaat er eveneens een 3D campagne die in 1978 werd uitgevoerd (seismische campagne 78-3D) in de bossen ten zuiden van het kanaal [R4-65].



**Figuur 4 - 46:** 3D representatie van de basis van het Ledo-Brusseliaan op basis van de interpretatie van seismische campagne 96-ON. De rode pijl geeft de Breuk van Rauw aan, de oranje die van Poppel. De verticale as geeft de diepte weer. De gele ster geeft de approximatieve ligging weer van de bergingssite.

In het Tertiair, en meer in het bijzonder in het Neogeen, werden geen breuken herkend in de ondergrond rond de bergingssite (Figuur 4 - 47). De afwezigheid van breuken werd in drie onafhankelijke interpretatie-oefeningen bewezen: de interpretatie van de 78-3D [R4-65], de interpretatie van testlijn 92-ON op de privéweg langs het kanaal (zuidkant, [R4-66]), en de interpretatie met OpendTect software van de 96-ON campagne, samen met die van de 78-3D en twee Poppel-Lommel-Maaseik-lijnen (PLM seismische campagne van de GDB) die voor dit doeleinde opnieuw geïnterpreteerd werden en geïnterpreteerd [R4-67].



**Figuur 4 - 47:** Interpretatie van seismische lijn PLM-8416 na reprocessing. Deze lijn loopt van Retie (links) via Postel tot aan de Nederlandse grens (rechts). De westelijke breuken van de Roerdalslenk komen tot uiting door duidelijke verspringingen en de verdieping van de lagen naar het oosten. Ook neemt de dikte van recentere lagen in dezelfde richting toe, de Diest Fm. aan de top (oker) en de Voort Fm. (fel blauw), een aanwijzing van synsedimentaire breukwerking. Het Krijt is in het fel groen aangegeven, de Boom Fm. in het paarsgrijs. De rode pijl geeft het bereik van het Neogeen weer. De projectie van de ligging van de site bevindt zich aan de uiterste linker zijde van het profiel.

#### 4.5.3.3 Onderzoek naar de breuk van Rauw

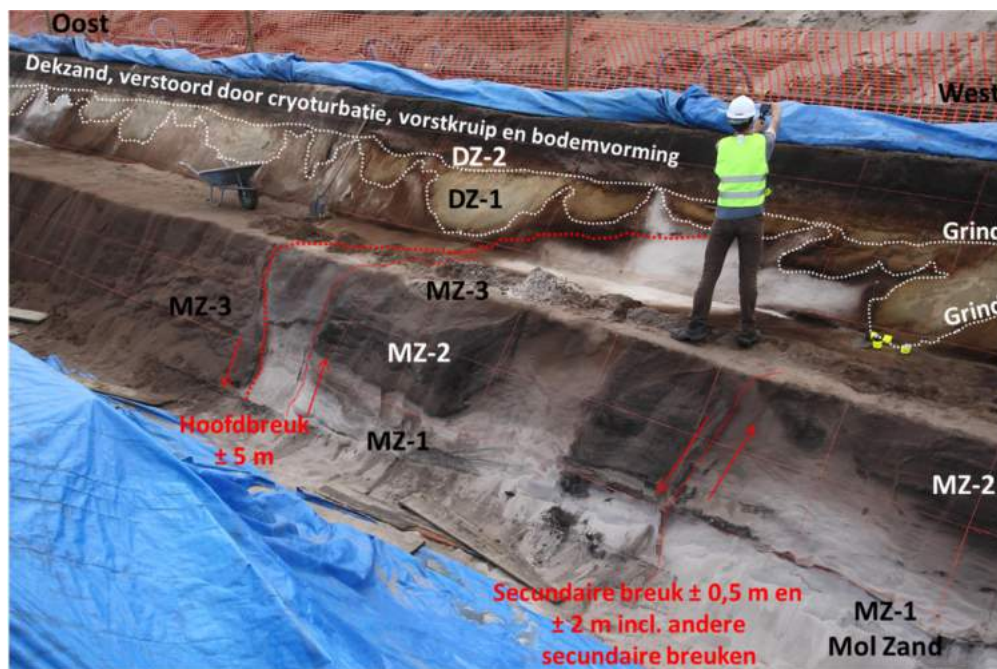
In samenwerking met de Dienst Seismologie van de Sterrenwacht van Ukkel werd een paleoseismologisch onderzoek door middel van het graven van sleuven loodrecht op de breuk van Rauw uitgevoerd in 2003 en 2014. Ten einde de beste locatie voor de sleuf te bepalen, werd voorafgaand een topografische studie verricht. Zeer vage topografische anomalieën werden op het terrein verder onderzocht met elektrische weerstand tomografie, CPT-sonderingen, grondradar en handboringen [R4-63].

Een constante verticale verplaatsing van 7 m werd vastgesteld voor verschillende laagvlakken tot 35 m diepte, aan de basis van het Mol Zand (ongeveer 3 miljoen jaar oud). Uit eerdere seismische metingen op het kanaal en op land (door UGent, KBIN en NIRAS) weten we nog dat voor diepere en oudere lagen de hoeveelheid verticale verplaatsing toeneemt tot 100 m aan de basis van het Neogeen. Uiteindelijk werden 2 sleuven van 3 m diepte en 100 m lengte uitgegraven, loodrecht georiënteerd op de breuk van Rauw, op de site 'Zeven Heerlijkheden' te Mol (Postel). De eerste sleuf bevatte enkel een kleine zijtak van de breuk en pas in de tweede sleuf (2014) kwam de hoofdbreukzone aan het licht (Figuur 4 - 48). In de sleuf verplaatst de breuk verschillend gekleurde lagen zand (wit, organisch rijk zwart, en bruin) van de top van het Mol Zand, maar niet de overliggende laat-glaciale dekzand afzettingen. De dekzand afzettingen zijn wel sterk verstoord door cryoturbatie (vervorming door ijswerking) tijdens de laatste ijstijd fases [R4-68].

De top van de breuk werd geërodeerd tussen de afzettingen van Mol en van het dekzand, samen met eventuele aanwijzingen voor individuele verplaatsingen en aardbevingen. Microscopische waarnemingen tonen aan dat de klei uit de breukzone bestaat uit gebroken fragmenten, waarbij ieder fragment opgebouwd is uit intacte



georiënteerde kleipartikels. De willekeurig georiënteerde fragmenten wijzen op een plotse beweging zoals bij aardbevingen, in tegenstelling tot een trage, continue kruipbeweging. Gedetailleerde stratigrafie van de sleuf en verscheidene dateringsmethoden (radiokoolstof, optische luminescentie, elektron-spin resonantie en kosmische straling nucliden) laten toe om de volledige 7 m breukverplaatsing te situeren tussen de top van het 'Zand van Mol' (1,2 miljoen jaar geleden) en de erosie met bovenliggende niet verplaatste dekzanden (45 ka geleden). Het grindhoudende alluviale terras van de confluente van Maas en Rijn is maar beperkt aanwezig in de regio. Het werd enkel afgezet in het gezakte blok, na een tijdelijke verlegging van hun confluentegebied tussen 1 en 0,5 miljoen jaar geleden, veroorzaakt door een aanzienlijke verplaatsing van de breuk. Het grootste deel (maar mogelijks niet alles) van de 7 m verplaatsing gebeurde dus waarschijnlijk in dat tijdvenster. In de sleuf werd deze terrasafzetting weggeërodeerd, maar herwerkt grind werd wel aan de basis van, en ook in het latere dekzand teruggevonden. Dit grind beschermde het gebied met de terrasafzetting tegen latere erosie waardoor dit vroeger lagergelegen gebied nu uitsteekt als het plateau van de Kempen. Door deze differentiële erosie is ook de huidige topografie over de breuk tegengesteld aan zijn bewegingsrichting, wat bevestigt dat er niet veel recente verplaatsing meer kan geweest zijn. De breuk van Rauw is, net zoals meerdere breuken binnen stabiele tektonische platen, gekenmerkt door actieve episodes, enkele honderdduizenden jaren lang met verscheidene aardbevingen, maar daarnaast ook 'slapende' periodes van enkele miljoenen jaren, zonder activiteit. Sinds ongeveer een half miljoen jaar geleden is de Rauw breuk terug zulke slapende periode ingegaan en er werd tijdens de gekende recente geschiedenis dan ook geen enkele seismische activiteit waargenomen in de omgeving van deze breuk.



Figuur 4 - 48: Zicht op de breukzone in de sleuf 2014 te Postel (site Zeven Heerlijkheden). De breuktakken zijn weergegeven in het rood, twee erosieve grindlaagjes in het wit. MZ = Mol Zand, met 1 = Wit, Lid van Maatheide; 2 = organisch rijk, zwart; en 3 = bruin zand door klei-coating rond zandkorrels, top. DZ = dekzand, met 1 = groenig, lemig fijn zand met wat grof grind aan de basis; en 2 = fijn zand met wat fijn grind en ook grof grind aan de basis (Beuningen horizont), dit zand vult lokaal diepe zandwiggens op, maar niet op deze foto.

## 4.5.4 Seismologie

### 4.5.4.1 Inleiding

#### 4.5.4.1.1 Definitie van de Ontwerpaardbevingen en van de Aardbeving Buiten Ontwerp

In dit deel tonen we aan dat de site wordt gekenmerkt door een stabiele geologie en een laag niveau van seismische activiteit vertoont. De seismische gevarenkans is voldoende nauwkeurig bestudeerd om een robuuste berging te kunnen ontwerpen. De seismische gevarenkans wordt berekend als de combinatie van de kans op een aardbeving met een bepaalde magnitude en de kans op het bereiken van een bepaald grondversnellingsniveau in functie van de afstand tot en de magnitude van de aardbeving.

Volgens de richtlijnen van het FANC dienen er twee Ontwerpaardbevingen (Eng. *Design Basis Earthquake* of DBE) en één Aardbeving Buiten Ontwerp (Eng. *Beyond Design Basis Earthquake* of BDBE) gedefinieerd te worden, met als uiteindelijk doel de berekening van de overeenkomstige responspectra aan het aardoppervlak op de plaats waar de bergingsinstallatie gebouwd zal worden [R4-69].

De kans op een optreden van een aardbeving, een gebeurtenis die volkomen willekeurig optreedt, wordt beschreven door een Poissonverdeling, met de levensduur van de beschouwde constructie, de overschrijdingskans en de terugkeerperiode of herhalingsduur als inputparameters.

De leidraad [R4-69] specificeert dat de kans op het optreden van de ontwerpaardbevingen gerelateerd aan de exploitatiefase (Ia) en aan de fases tot en met de opheffing van de nucleaire reglementaire controle, niet groter mag zijn dan een paar procent voor de duur van deze fases, respectievelijk 50 en 350 jaar. In verband met de Aardbeving Buiten Ontwerp stelt de leidraad dat deze significant groter dient te zijn dan de Ontwerpaardbeving. De overschrijdingskans ( $P$ , Eng. *probability of exceedance*) in een bepaalde tijdspanne ( $T_L$ , Eng. *life time*) staat in verband met de gemiddelde terugkeerperiode ( $T_R$ , Eng. *return period*) volgens de formule:

$$T_R = \frac{-T_L}{\ln(1 - P)}$$

Er wordt een overschrijdingskans van 4% beschouwd. Dit is equivalent met terugkeerperiodes van 1225 jaar voor de operationele fase (Ia), en 8575 jaar voor de fases tot en met de opheffing van de nucleaire reglementaire controle. De Aardbeving Buiten Ontwerp definiëren we aan de hand van een terugkeerperiode van 20 000 jaar.

#### 4.5.4.1.2 Methodologie voor de bepaling van de seismische gevarenkans

De methodologie bestaat uit volgende stappen:

1. De eerste stap bestaat uit een probabilistische evaluatie van de seismische gevarenkans (Eng. *seismic hazard*) om de responspectra te bepalen voor de twee DBE's en de BDBE op het niveau van de seismische sokkel.
2. De tweede stap omvat de bepaling van de spectrale transferfunctie voor de sedimentaire deklagen. Deze transferfunctie karakteriseert het site-effect, dit is het effect waarbij seismische golven bij hun doorgang door losse sedimentlagen versterkt of gedempt worden bij bepaalde frequenties.

3. De derde en laatste stap bestaat uit de berekening van de responspectra aan het aardoppervlak voor de twee DBE's en de BDBE, door convolutie van de respectievelijke responspectra op het niveau van de harde sokkel met de spectrale transferfunctie.

Deze drie stappen, uitgevoerd in [OD-046] worden beschreven in de volgende secties.

#### 4.5.4.1.3 Aardbevingscatalogus

##### Compilatie

De basisgegevens voor de evaluatie van de seismische gevarenkans zijn afkomstig uit de aardbevingscatalogus van de Koninklijke Sterrenwacht van België (KSB) ([R4-74]). Deze gegevens beïnvloeden de definitie van de verschillende seismotektonische bronzones en bepalen de seismische activiteit (MFD's) van elke bronzone. De catalogus is opgebouwd uit een heterogene dataset van oorsprongtijd, locatie van epi- en/of hypocentrum, magnitude en maximale intensiteit, afkomstig van historische (1350-1910) en instrumentele gegevens (na 1911).

Van de historische gegevens zijn enkel beschrijvingen beschikbaar zijn van de manier waarop ze gevoeld werden door de mens, en van de schade die ze eventueel berokkenden. Aan deze waarnemingen kan dan een zgn. macroseismische intensiteit toegekend worden. De instrumentele gegevens bestaan uit magnitudebepalingen (op basis van metingen door het Belgisch netwerk of door andere Europese observatoria), als intensiteitsgegevens (op basis van enquêtes bij lokale autoriteiten en sinds 2000 ook via internet).

De aardbevingscatalogus van de KSB wordt continu aangevuld en bijgewerkt. Enerzijds worden regelmatig nieuwe aardbevingen geregistreerd. Anderzijds wordt ook actief gezocht naar nieuwe historische bronnen en andere informatie om de bronparameters van aardbevingen uit het verleden beter te kunnen bepalen.

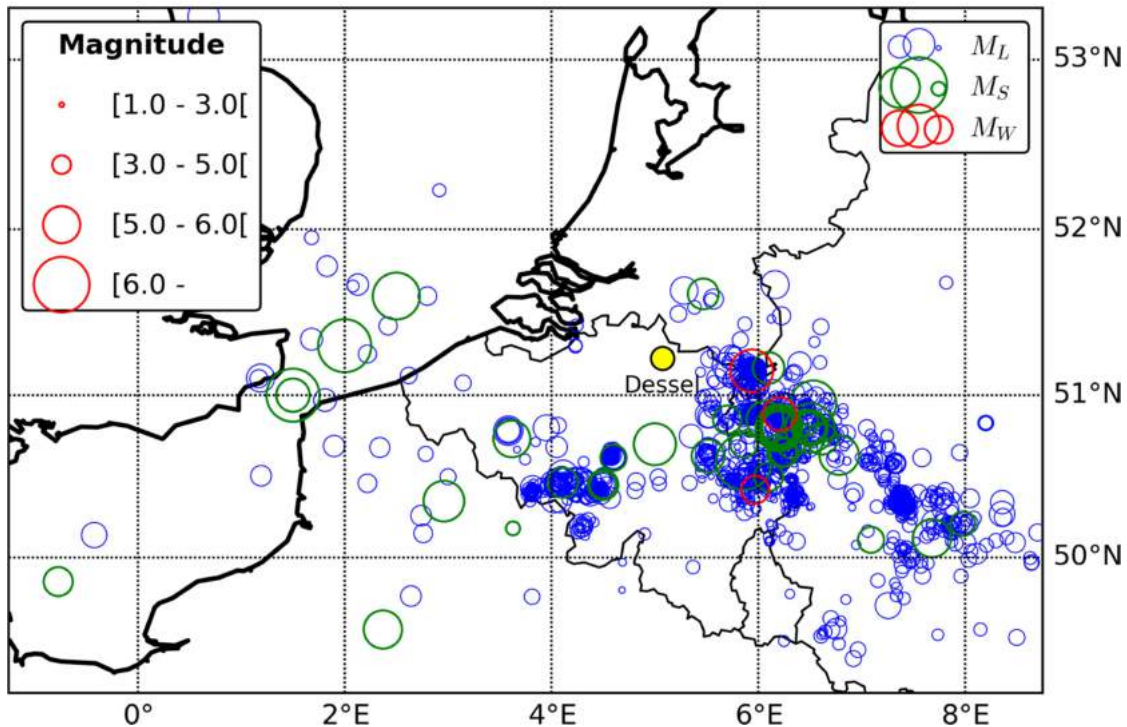
Zo werd in het kader van deze studie ook specifiek gezocht naar historische bronnen die de effecten beschrijven van aardbevingen in de 14<sup>e</sup> tot en met de 19<sup>e</sup> eeuw in de omgeving van Dessel [R4-75].

##### Selectie

Voor deze studie zijn de aardbevingen geselecteerd in de catalogus van de KSB die beantwoorden aan de volgende criteria:

- Tijd: tussen 01/01/1350 (jaar vanaf wanneer KSB-catalogus verondersteld wordt compleet te zijn voor  $M \geq 5.0$ ) en 31/12/2012 (laatste volledig jaar voor de aanvang van de studie, gerapporteerd in [R4-74]);
- Locatie: gelegen binnen rechthoekig gebied tussen de lengtegraden 1,25 °W en 8,75 °E, en tussen de breedtegraden 49,15 °N en 53,30 °N. Dit gebied komt ongeveer overeen met de uiterste grenzen van de geselecteerde bronzoneringsmodellen (zie §4.5.4.2.3);
- Magnitude:  $M \geq 0,1$  (om aardbevingen zonder magnitudebepaling uit te sluiten).

De ruwe catalogus die op deze manier werd verkregen bevat 1710 aardbevingen. Figuur 4 - 49 toont een kaart met de epicentra van deze aardbevingen.



Figuur 4 - 49: Kaart met de aardbevingsepicentra in de ruwe aardbevingscatalogus. Epicentra zijn gekleurd volgens magnitudeschaal: Momentmagnitude ( $M_W$ , rood), oppervlaktegolfmagnitude ( $M_S$ , groen) en lokale magnitude ( $M_L$ , blauw).

### Bewerking

Het aantal aardbevingen in een bepaalde zone en een bepaalde tijdspanne vertoont een loglineair verband met de magnitude (Gutenberg-Richter-relatie). Vooraleer de magnitude-frequentieverdelingen kunnen berekend worden, is het nodig om een aantal bewerkingen toe te passen op de ruwe catalogus, in deze volgorde:

#### 1. Omzetting naar een homogene magnitudeschaal

In Figuur 4 - 49 is te zien dat er drie verschillende magnitudeschalen voorkomen in de ruwe catalogus. Voor historische aardbevingen is de oppervlaktegolfmagnitude ( $M_S$ ) afgeleid uit macroseismische intensiteitsdata. Voor instrumentele aardbevingen gaat het overwegend om lokale magnitude ( $M_L$ ) en in een paar gevallen ook om momentmagnitude ( $M_W$ ). Indien we alle aardbevingen willen meenemen in de analyse moeten deze magnitudes naar een gemeenschappelijke schaal omgezet worden. Aangezien de meeste GMPE's<sup>30</sup> gedefinieerd zijn voor  $M_W$  en dat ruptuurdimensies in de PSHA software ook volgens  $M_W$  geschaald worden, is het logisch om  $M_W$  te hanteren doorheen de volledige analyse. De relatie om  $M_L$  om te zetten naar  $M_W$  [R4-76], en één relatie om  $M_S$  om te zetten naar  $M_W$  [R4-77] werden gebruikt.

<sup>30</sup> Zie 4.5.4.2.1, 'Berekening', 3. Selectie van een geschikt grondbewegingsmodel voor de regio

## 2. Ontclusteren

Ontclusteren omhelst het verwijderen van afhankelijke aardbevingen (voorschokken, naschokken, seismische zwermen) uit de catalogus om te verzekeren dat de catalogusactiviteit overeenkomt met een Poissonproces. Afhankelijke aardbevingen kunnen onderscheiden worden op basis van hun nabijheid in ruimte en tijd t.o.v. andere aardbevingen en/of op basis van een hogere activiteit dan het langetermijngemiddelde. De meeste algoritmen maken hiervoor gebruik van spatiale en temporele 'vensters' waarbinnen alle kleinere aardbevingen als afhankelijk aangeduid worden. In deze studie werd het Uhrhammer-venster [R4-78], en het Grünthal-venster [R4-79] gebruikt.

## 3. Compleetheidsanalyse

Dit is een analyse om voor verschillende drempelmagnitudes de compleetheidsdatum te bepalen. Dit is de datum vanaf wanneer geen enkele aardbeving met een magnitude groter dan of gelijk aan de beschouwde drempelmagnitude ontbreekt in de catalogus. De drempelmagnitude is in de loop van de geschiedenis veranderd door evoluties in de historische archivering en in seismische netwerken. De meeste methodes berusten op de detectie van veranderingen in de seismische activiteit, met andere woorden afwijkingen van een constante Poisson-activiteit. De catalogus moet hiervoor eerst ontclusterd worden, aangezien seismische sequenties ook gepaard gaan met een verandering van de activiteit. De methode die werd toegepast, is de zogenaamde CUMulative VIstuele (CUVI) methode [R4-80]. Dit is een grafische methode waarin de compleetheidsdatum voor een bepaalde drempelmagnitude visueel bepaald wordt door middel van een grafiek van het aantal aardbevingen groter dan of gelijk aan deze magnitude in functie van de tijd. Veranderingen in compleetheid zijn dan zichtbaar als veranderingen in de helling (normaal gezien een toename), wat resulteert in divergerende curves voor opeenvolgende drempelmagnitudes. De data van deze veranderingen kunnen in verband gebracht worden met gekende veranderingen in de historische archivering of in het seismisch netwerk. Voor elke compleetheidsdatum is vervolgens de overeenkomende compleetheidsmagnitude geëvalueerd.

Na toepassing van deze drie stappen bevat de bewerkte catalogus nog 382 aardbevingen (zie appendix A van [OD-046]).

### 4.5.4.2 Probabilistische evaluatie van de seismische gevarenkans (PSHA) op het niveau van de harde sokkel

#### 4.5.4.2.1 Principe van PSHA

##### Berekening

Een probabilistische evaluatie van de seismische gevarenkans (Eng. *probabilistic seismic hazard assessment*, of PSHA) omvat de volgende drie basiselementen ([R4-70], [R4-71]):

1. **Afbakening van één of meer seismische bronzones** waar toekomstige aardbevingen verondersteld worden te zullen optreden. Deze bronzones kunnen ofwel gekende actieve breuken zijn, ofwel seismotektonische zones, indien aardbevingen niet eenduidig met individuele breuken in verband gebracht kunnen worden. Een seismotektonische zone is een gebied met min of meer homogene geologische, geofysische en

seismologische karakteristieken, waar de kans op aardbevingen verondersteld wordt uniform te zijn. Voor elke seismische bron dienen de mogelijke ruptuurgeometrieën gedefinieerd te worden. Dit omvat de oriëntatie, helling en mechanisme van een breuk of van de belangrijkste breuken binnen een seismotektonische zone, de boven- en ondergrens van de seismogene zone en (enkel voor seismotektonische zones) de diepteverdeling van aardbevingshypocentra. Daarnaast moet ook het aardkorst-type gekend zijn, dit is van belang voor de selectie van geschikte grondbewegingsmodellen (zie verder in punt 3).

2. **Bepaling van de seismische activiteit van elke seismische bronzone.** Deze wordt gekarakteriseerd door een magnitude-frequentieverdeling (Eng. *magnitude-frequency distribution*, MFD), bepaald op basis van de catalogus van instrumenteel en historisch waargenomen aardbevingen. Een MFD beschrijft de overschrijdingsfrequentie voor een interval van magnitudes tussen een minimale ( $M_{min}$ ) en een maximale magnitude  $M_{max}$  die door de bron geproduceerd kan worden. Deze laatste parameter is zeer moeilijk te bepalen, vooral in intraplaatzones zoals België, omdat  $M_{max}$  zeer zelden wordt waargenomen. Schattingen zijn meestal gebaseerd op paleoseismologische informatie of op analogie met tektonisch gelijkaardige gebieden. De ondergrens  $M_{min}$  is een bouwkundige parameter en vertegenwoordigt de laagste magnitude die schade zou kunnen veroorzaken. De drempelmagnitude  $M_{min}$  is de laagste magnitude waarmee rekening gehouden wordt in een PSHA-analyse: in deze studie wordt een  $M_{min}$  van 4,5 gehanteerd.
3. **Selectie van een geschikt grondbewegingsmodel (ook dempingswet genoemd) voor de regio.** Grondbewegingsmodellen beschrijven de variatie van grondbewegingen door aardbevingen, meer bepaald de afname van de amplitude van seismische golven in functie van bron-, pad- en siteparameters, onder andere de magnitude van een aardbeving en de afstand tot het epicentrum ervan. Meer recente modellen bevatten dikwijls ook termen voor andere bronzoneparameters (bv. hypocentrale diepte, breukmechanisme, snelheid in de harde sokkel, grondtype, spanningsval, ...). De meeste grondbewegingsmodellen zijn zgn. GMPE's (Eng. *ground-motion prediction equations*) die de grondbewegingsintensiteit uitdrukken in (horizontale) grondversnelling (piekgrondversnelling of spectrale versnelling). GMPE's worden afgeleid uit registraties door accelerometers, soms gecombineerd met stochastische modellering. Er bestaat een hele waaier van GMPE's in de literatuur, die van elkaar verschillen op het vlak van herkomstgebied van de gebruikte gegevens, magnitudebereik, afstandsbereik, metriek waarin de afstand uitgedrukt wordt, frequentiebereik, enz. Een belangrijk onderscheid is de snelheid in de harde sokkel, die gerelateerd is aan het type van aardkorst in het herkomstgebied: algemeen worden intraplaatzones gekenmerkt door koudere korst met hogere schuifgolfsnelheden ('hard rock',  $V_S > 1500$  m/s), waardoor seismische energie efficiënter wordt doorgestuurd dan in tektonisch meer actieve zones, gekenmerkt door een warmere en meer heterogene korst met lagere schuifgolfsnelheden ('standard rock',  $V_S \sim 550 - 1200$  m/s). Het gevolg is dat aardbevingen met eenzelfde magnitude over een groter gebied worden gevoeld in intraplaatzones. Wegens de lagere activiteit zijn er echter minder gegevens beschikbaar voor deze zones. Bij gebrek aan voldoende gegevens is het daarom tot nog toe niet mogelijk gebleken een specifieke GMPE te ontwikkelen voor België, waardoor we aangewezen zijn op GMPE's voor andere gebieden.

Op basis van deze elementen kan dan de maximaal verwachte piekgrondversnelling in een bepaalde tijdspanne of terugkeertijd worden berekend. Die terugkeertijd is 1225 jaar voor de exploitatiefase (Ia), en 8575 jaar voor de fases tot en met de opheffing van de nucleaire reglementaire controle, wat overeenkomt met een overschrijdingskans van 4% in 50 jaar (exploitatiefase (Ia) en 350 jaar voor de volgende fases tot en met de

opheffing van de nucleaire reglementaire controle) zoals beschreven in §4.5.4.1.1. Voor de onderzochte site wordt de ‘hazard-integraal’ berekend, onder de vorm van de overschrijdingsfrequentie. Het eindresultaat is een ‘gevaarskanscurve’ die de overschrijdingsfrequentie weergeeft in functie van de maximaal verwachte groundbewegingsparameter (versnelling, snelheid of verplaatsing).

### **Onzekerheden in PSHA**

Het doel van PSHA is om alle onzekerheden in rekening te brengen. Deze onzekerheden kunnen opgedeeld worden in epistemische onzekerheden (te wijten aan onvolledige kennis waardoor we niet kunnen onderscheiden welk model juist is) en willekeurige of aleatoire onzekerheden (te wijten aan de onvoorspelbaarheid van de natuur). Epistemische onzekerheden kunnen gereduceerd worden door verder onderzoek of door nieuwe gegevens, maar dit is niet het geval voor aleatoire onzekerheden omdat deze de intrinsieke natuurlijke variabiliteit beschrijven. Deze twee verschillende klassen van onzekerheden vereisen een verschillende aanpak in PSHA. Aleatoire onzekerheden worden opgenomen in de hazard-integraal, terwijl epistemische onzekerheden worden ondergebracht in een logische boom (Eng. *logic tree*).

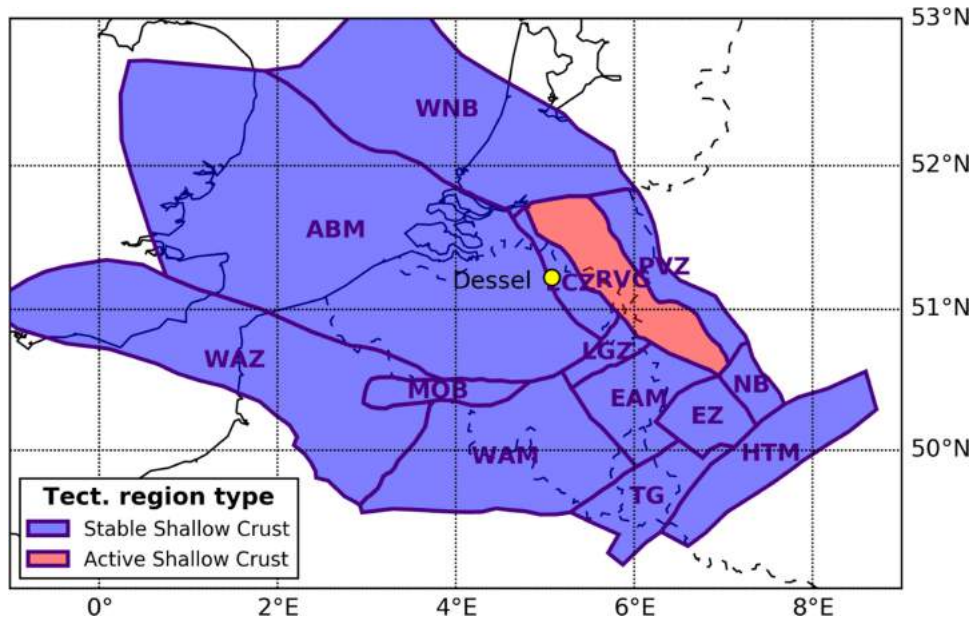
#### **4.5.4.2.2 Afbakening van seismische bronzones**

Zoals in eerdere PSHA-studie voor België [R4-81], is er gewerkt met seismotektonische zones i.p.v. met individuele breuken. De belangrijkste reden hiervoor is dat tot op heden enkel in de Roerdalslenk actieve breuken gekend zijn, en dat zelfs voor deze breuken de frequentie-magnituderelatie moeilijk te bepalen is. De afbakening van seismotektonische zones in gebieden met een relatief lage seismische activiteit is dikwijls een subjectieve oefening. In deze studie beschouwen we twee zeer uiteenlopende bronzoneringmodellen die allebei specifiek voor België werden ontwikkeld: het Seismotektonisch model en het Tweezonemodel.

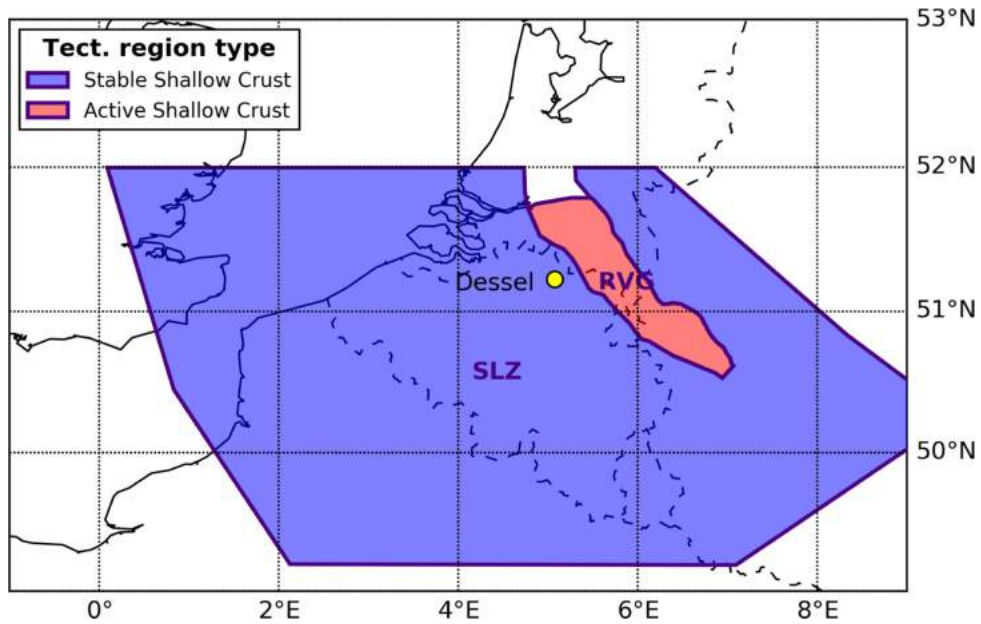
#### **Seismische bronzonering**

Het Seismotektonisch bronmodel is gedeeltelijk gebaseerd op het bronmodel 2 van Leynaud et al. [R4-81] en wordt in detail beschreven in [R4-218]. De grenzen van de zones werden aangepast om zoveel mogelijk overeen te stemmen met gekende geologische structuren en geofysische contrasten. Het Seismotektonisch model bestaat uit 14 zones. De ligging van deze zones is weergegeven in Figuur 4 - 50. De bergingsite in Dessel situeert zich in de Oostelijke Kempenzone (ECZ), dicht bij de grens met het Anglo-Brabantmassief.

Het Tweezonemodel is een minimalistisch model dat, zoals de naam aangeeft, uit slechts twee zones bestaat. De verantwoording voor dit model berust op de waarneming dat de Roerdalslenk gekenmerkt wordt door een eerder continue seismische activiteit, terwijl het seismiciteitspatroon daarbuiten zeer diffuus is in ruimte en tijd. We onderscheiden twee zones: de Roerdalslenk en de zogenaamde 'Single Large Zone' (grote ééngemaakte zone). De buitengrenzen van deze laatste werden zo dicht mogelijk omheen het gebied met de meeste historische en instrumentele seismische activiteit getrokken. De ligging van de zones van dit model is weergegeven in Figuur 4 - 51. In het Tweezonemodel situeert de onderzochte site in Dessel zich in de 'Single Large Zone', relatief dicht bij de grens met de Roerdalslenk.



Figuur 4 - 50: Kaart van het Seismotektonisch bronzoneringsmodel. Gele bol geeft de locatie aan van de bergingsite.



Figuur 4 - 51: Kaart van het Tweezonemodel (RVG: Roerdalslenk; SLZ: 'single large zone').



### Seismische karakteristieken

Voor toepassing in PSHA moeten de seismische karakteristieken van de verschillende bronzones in deze modellen op een uniforme manier bepaald worden. Deze karakteristieken worden hieronder besproken en zijn samengevat in Tabel 4 - 32 en Tabel 4 - 33.

#### 1. Ruptuurkarakteristieken

Hoewel de geselecteerde bronmodellen geen actieve breuken bevatten, worden ook voor seismotektonische zones aardbevingen gemodelleerd in de PSHA-software als breukrupturen met een bepaalde strekking, helling en haardmechanisme. We bepalen daarom voor elke zone twee of vier strekkingen overeenkomend met de belangrijkste breukrichtingen in die zone, en een procentuele verdeling van de verschillende breuktypes (normale, inverse en laterale breuken). Voor de helling wordt slechts één waarde (45°) aangenomen. Op deze manier bekomen we een verdeling van maximaal 12 combinaties die de aleatoire onzekerheid op de ruptuurkarakteristieken vertegenwoordigt.

#### 2. Hypocentrale diepte

In eerdere studies [R4-81] werd een vaste hypocentrale diepte beschouwd voor bronzones, 5 km voor zones LGZ (Liège-Gulpenzone) en MOB (Mons-Orchiesbekken) in het Seismotektonisch model, en 10 km voor alle andere zones. Dit lijkt echter een te simpele benadering in vergelijking met de variabiliteit van hypocentrale dieptes in de aardbevingscatalogus. Voor GMPE's met een diepteterm kan dit het eindresultaat in belangrijke mate beïnvloeden. Op basis van een analyse van histogrammen van de hypocentrale diepte voor de KSB-catalogus en voor enkele relevante internationale aardbevingscatalogi werd beslist om voor deze parameter een discrete normale verdeling te beschouwen met een ondergrens van 5 km voor alle zones en een variabele bovengrens (15, 20 of 25 km). Ook deze verdeling vertegenwoordigt een aleatoire onzekerheid. In de PSHA-software definiëren deze hypocentrale dieptes het centrum van de gemodelleerde rupturen.

#### 3. Boven- en ondergrens van de seismogene zone

Deze parameter beschrijft hoe ver naar boven en naar onder de gemodelleerde rupturen zich kunnen uitstrekken vanuit hun hypocentrum. Wat de bovengrens betreft nemen we aan dat alle rupturen het aardoppervlak (= 0 km diepte) kunnen bereiken, zoals gedemonstreerd door paleoseismologisch onderzoek in de Roerdalslenk. De ondergrens van de seismogene zone valt normaal gezien samen met de ondergrens van de seismiciteit en werd vastgelegd door 5 km toe te voegen aan de maximale waarde van de hypocentrale diepteverdeling.

#### 4. Maximale magnitude (Mmax)

De methode om de geëvalueerde Mmax te bepalen, is beschreven in §3.4.6 van [OD-046]. In het Tweezone model zijn vier verschillende Mmax waarden gebruikt, afhankelijk of de zone als 'stabiele continentale regio' (SCR) dan wel als 'extentionele SCR' of actieve korst (SCR-ext) gecatalogeerd wordt.

Tabel 4 - 32: Belangrijkste parameters van bronzones in het Seismotektonisch bronmodel (L – laterale breuken, N – normale breuken, I – inverse breuken).

ID	Naam	Oppervlakte (km <sup>2</sup> )	Strekking min/max (°)	Breuktype (L / N / I) (%)	Hypocentrale diepte min/max (km)	Waargenomen Mmax (M <sub>s</sub> )	Aardkorst domein
ABM	Anglo-Brabantmassief	52300	025 / 360	25 / 25 / 50	5 / 25	6,0	SCR
EAM	Oostelijk Ardennenmassief	5300	025 / 360	50 / 35 / 15	5 / 25	6,3	SCR
ECZ	Oostelijke Kempenzone	2250	145 / 325	30 / 70 / 00	5 / 20	4,3	SCR
EZ	Eifelzone	3000	000 / 360	34 / 33 / 33	5 / 20	2,9	SCR
HTM	Hunsrück-Taunusmassief	7600	045 / 360	34 / 33 / 33	5 / 20	4,8	SCR
LGZ	Liège-Gulpenzone	1350	070 / 360	50 / 15 / 35	5 / 20	4,7	SCR
MOB	Mons-Orchiesbekken	2300	000 / 360	45 / 10 / 45	5 / 15	4,3	SCR
NB	Neuwiedbekken	1550	045 / 360	50 / 50 / 00	5 / 20	3,5	SCR
PVZ	Peel-Venlozone	3900	145 / 325	30 / 70 / 00	5 / 20	3,4	SCR
RVG	Roerdalslenk	6700	145 / 325	30 / 70 / 00	5 / 20	5,7	SCR-ext
TG	Trierslenk	4950	000 / 360	34 / 33 / 33	5 / 20	1,4	SCR
WAM	Westelijk Ardennenmassief	15250	000 / 360	34 / 33 / 33	5 / 20	3,4	SCR
WAZ	Weald-Artois-zone	24600	125 / 305	50 / 00 / 50	5 / 20	6,0	SCR
WNB	West-Nederlands Bekken	21250	125 / 305	30 / 70 / 00	5 / 20	-	SCR

Tabel 4 - 33: Belangrijkste parameters van bronzones in het Tweezonemodel (L – laterale breuken, N – normale breuken, I – inverse breuken).

ID	Naam	Oppervlakte (km <sup>2</sup> )	Strekking min/max (°)	Breuktype (L / N / I) (%)	Hypocentrale diepte min/max (km)	Waargenomen Mmax (M <sub>s</sub> )	Aardkorst domein
RVG	Roerdalslenk	6700	145 / 325	30 / 70 / 00	5 / 20	5,7	SCR-ext
SLZ	Single Large Zone	149800	000 / 360	34 / 33 / 33	5 / 25	6,3	SCR

#### Bepaling van MFD's

De tweede stap in de probabilistische evaluatie van de seismische gevarenkans bestaat uit het berekenen van de magnitude-frequentieverdeling (MDF) voor elke bronzone van de geselecteerde bronmodellen. Dit is in detail beschreven in §3.4.7 van [OD-046]. Voor voldoende grote zones en voldoende lange tijdsintervallen volgt de MDF meestal een Gutenberg-Richter relatie [R4-82], waarin een loglineair verband bestaat tussen het aantal aardbevingen groter dan een bepaalde magnitude en de magnitude:

$$\log N = a - bM$$

Waarin:

$N$  : aantal aardbevingen met magnitude  $> M$ ;

$a$  : intercept met de y-as ( $\log N$  voor  $M = 0$ ), geeft aan hoe actief de zone is;

$b$  : helling van de curve, geeft de verhouding tussen kleine en grote aardbevingen weer.

In plaats van slechts één MFD te bepalen per zone voeren we een uitgebreidere analyse uit waarbij we rekening houden met onzekerheden in de aardbevingscatalogus (epicentrale locatie, magnitudebepaling) en in de verschillende bewerkingstappen (twee relaties voor conversie van ML naar MW, twee ontclusteringsvensters en twee methodes om de Gutenberg-Richter-relatie te berekenen). De gemiddelde a- en b-waarden en hun standaarddeviatie worden voor elke bronzone opgelijst in Tabel 4 - 34 en Tabel 4 - 35.

**Tabel 4 - 34: Gutenberg-Richter a- en b-waarden bepaald voor de bronzones in het Tweezonemodel. Sigma-waarde is de standaardafwijking.**

ID	gemiddelde a-waarde	sigma a-waarde	gemiddelde b-waarde	sigma b-waarde
RVG	2,501	0,249	0,938	0,071
SLZ	2,977	0,130	0,947	0,038

**Tabel 4 - 35: Gutenberg-Richter a- en b-waarden bepaald voor de bronzones in het Seismotektonisch model. Voor bronzones gemarkeerd met \* waren er te weinig gegevens om de MFD te berekenen en werd de gemiddelde waarde voor stabiele continentale regio's [R4-71] genomen, geschaald volgens oppervlakte. Sigma-waarde is de standaardafwijking.**

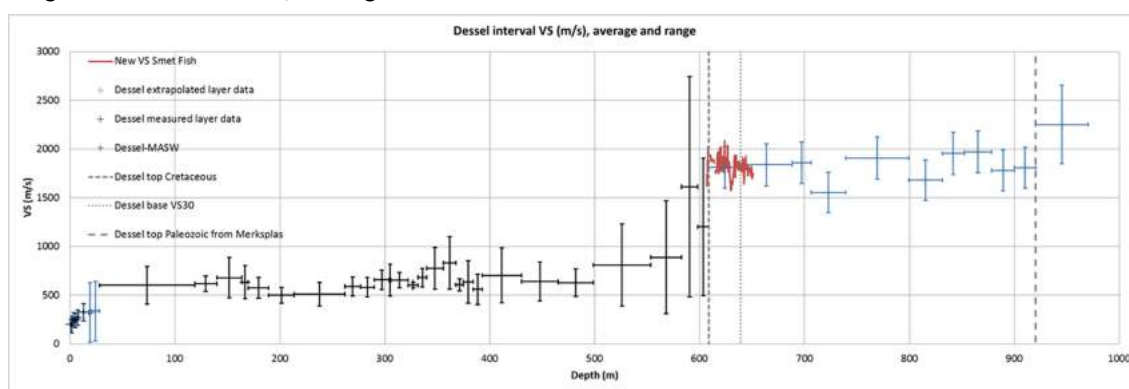
ID	Gemiddelde a-waarde	sigma a-waarde	gemiddelde b-waarde	sigma b-waarde
ABM	1,425	0,146	0,760	0,041
EAM	2,052	0,281	0,938	0,086
ECZ	1,505	0,187	0,934	0,054
EZ	1,592	0,209	1,068	0,075
HTM	2,468	0,209	1,068	0,075
LGZ	1,856	0,281	0,938	0,086
MOB	1,757	0,252	0,854	0,067
NB	3,162	0,356	1,196	0,141
PVZ	1,355	0,187	0,934	0,054
RVG	2,512	0,187	0,934	0,054
TG*	1,158	0,03	0,975	0,047
WAM	1,552	0,281	0,938	0,086
WAZ	1,250	0,146	0,760	0,041
WNB*	1,768	0,03	0,975	0,047

#### 4.5.4.2.3 Selectie van een geschikt grondbewegingsmodel (GMPE)

De keuze van een geschikt grondbewegingsmodel of dempingswet is een kritische factor in een PSHA-analyse. De geselecteerde GMPE's moeten geldig zijn voor het type aardkorst in de verschillende bronzones en voor de karakteristieken van de sokkel onder de site waarvoor de berekening wordt uitgevoerd.

### Sitekarakterisatie

Het Krijt vormt de grens vormt tussen de harde sokkel en losse sedimentlagen. In boring ON-Dessel-1, op slechts 500 m van de bergingsite bevindt het Krijt zich op een diepte van 608,7 m. Deze grens komt overeen met de grootste sprong in de drukgolfsnelheid (van ~1900 m/s naar 2800 – 3200 m/s), zoals aangetoond door intervallsnelheden op basis van reflectieseismische exploratieprofielen en verticale seismische profilering in de Kempen [R4-83]. De schuifgolfsnelheid ( $V_S$ ) in de top van het Krijt kon dankzij recente metingen in een boorgat in de omgeving van de bergingsite bepaald worden op ongeveer 1800 m/s (Figuur 4 - 52). Om de sokkel te karakteriseren is er daarnaast ook een analyse uitgevoerd om een andere belangrijke parameter (kappa of  $\kappa_0$ ) te bepalen die de demping van hoge frequenties van de grondbeweging beschrijft (zie 'Part I', §4.1.2 van [OD-046]). De gevonden waarde van  $\kappa_0$  bedraagt 0,027 s.



Figuur 4 - 52: Schuifgolfsnelheid in functie van de diepte in de 'Smet-Fish' boring te Dessel. Blauw:  $V_S$  afgeleid op basis van boring te Merksplas [R4-84]; rood: *in situ* gemeten  $V_S$  [R4-85]

### GMPE-selectie

Aangezien de  $V_S$ -waarde van 1800 m/s gemeten in de sokkel onder de site beduidend hoger is dan het interval overeenkomend met standaardrotscondities (Eng. *standard rock*), zijn we genoodzaakt om zgn. *hardrock*-GMPE's toe te passen. Het probleem hierbij is dat de meeste gepubliceerde *hardrock*-GMPE's ontwikkeld zijn voor het oosten van Noord-Amerika, meestal gebaseerd zijn op stochastische modellering door gebrek aan gegevens, en een bijkomende aanpassing vereisen om het verschil in  $V_S$  en kappa tussen het herkomstgebied (gebied waarvoor de GMPE ontwikkeld werd) en het doelgebied (gebied waar de GMPE wordt toegepast) te compenseren. Omwille van deze beperkingen en van het experimentele karakter van deze zgn. *host-to-target* aanpassingsmethode is er gekozen voor een mix van standaardrots-GMPE's en *hardrock*-GMPE's die deels gebaseerd is op de selectie in het kader van het SHARE-project ([R4-86]):

- **GMPE's gedefinieerd voor standaardrotscondities:** [AkkarEtAl2013](#) ([R4-87]) en [FaccioliEtA2010](#) ([R4-88]). Dit zijn bijgewerkte versies van GMPE's die in SHARE geselecteerd werden voor zowel actieve als stabiele korst. Beide GMPE's werden ondersteund door alle geconsulteerde experts en sluiten ook goed aan bij de beschikbare Europese gegevens.
- **GMPE's gedefinieerd voor zowel standaardrots- als hardrockcondities:** [AtkinsonBoore2006](#) ([R4-89]): dit is een bijgewerkte versie van een GMPE die weliswaar niet werd geselecteerd in het SHARE-project,

maar wel ondersteund werd door de meeste geconsulteerde experts. Deze GMPE is geldig voor een  $V_S$ -bereik van 800 tot 2000 m/s. Dit gebeurt op basis van interpolatie en vereist geen aanpassingen.

- **Hardrock-GMPE's:** Campbell2003 ([R4-90]) en ToroEtAl2002 ([R4-91]): Beide GMPE's zijn oorspronkelijk gedefinieerd voor zeer harde rots met  $V_S=2800$  m/s en  $\kappa_0=0.007$  s en vereisen daarom aanpassingen van  $V_S$  en  $\kappa_0$  naar sitespecifieke condities. Beide GMPE's werden in het SHARE-project geselecteerd voor stabiele korst, maar de gehanteerde aanpassingscoëfficiënten zijn ontoereikend voor de sitekarakteristieken in Dessel. Het was daarom noodzakelijk om zelf een procedure voor aanpassing te ontwikkelen op basis van gepubliceerde procedures [OD-046]. Hardrock-GMPE's voorspellen beduidend hogere acceleraties bij hoge spectrale frequenties, zelfs na de aanpassingen.

De voornaamste parameters van de geselecteerde GMPE's worden samengevat in Tabel 4 - 36. Merk onder meer op dat de selectie een mix bevat van GMPE's met een afstandsmetriek die afhankelijk is van de hypocentrale diepte ( $R_{rup}$  = kortste afstand tot het ruptuurvlak of 'ruptuurafstand') en GMPE's met een diepte-onafhankelijke afstandsmetriek ( $R_{JB}$  = kortste horizontale afstand tot de oppervlakteprojectie van het ruptuurvlak of 'Joyner-Boore afstand'). Aan ieder van de GMPE's is er een gewicht toegekend in de onzekerheidsanalyse (zie 'Part I', §5.2.2.1 van [OD-046]). Een verhouding 0,6 en 0,4 tussen 'hard rock'- en standaardrots-GMPE's is gebruikt. Daarna is voor iedere GMPE aan de hand van een aantal parameters nagegaan hoe representatief de GMPE is voor gebruik in dit specifieke geval.

**Tabel 4 - 36: Belangrijkste parameters van de geselecteerde GMPE's en de respectieve gewichten die hen toegekend werden.  $R_{JB}$  – Joyner-Boore afstand;  $R_{rup}$  – ruptuurafstand; PGA – piekgrondversnelling; PGV – piekgrondsnelheid**

GMPE	Afstandsmetriek	Afstandsbereik (km)	Magnitudebereik	Periodebereik (s)	$V_S$ (m/s)	Type korst	Gewicht in PSHA
AkkarEtAl2013	$R_{JB}$	0 - 200	4,0 – 7,6	0,025 – 5 s + PGA, PGV	750	Actief	0,26
AtkinsonBoore2006'	$R_{rup}$	1 - 1000	3,5 – 8,0	0,025 – 5 s + PGA, PGV	800 – 2000 (interpolatie)	Stabiel	0,21
Campbell2003	$R_{rup}$	0 - 1000	5,0 – 8,2	0,02 – 4 s + PGA	2800	Stabiel	0,25
FaccioliEtAl2010	$R_{rup}$	1 - 150	4,5 – 7,6	0,05 – 20 s + PGA	800	Actief	0,14
ToroEtAl2002	$R_{JB}$	1 - 1000	5,0 – 8,0	0,03 – 2 s + PGA	2800	Stabiel	0,14
<b>Overlap</b>		<b>1 - 150</b>	<b>5,0 – 7,6</b>	<b>0,05 – 2 s + PGA</b>			

#### 4.5.4.2.4 Definitie van de 'logic tree'

Zoals beschreven in §4.5.4.2.1 worden logische bomen toegepast in PSHA om epistemische onzekerheden in rekening te brengen. De logische boom in deze studie bestaat uit vier aftakkingsniveaus:

- **Bronmodel:** de twee bronmodellen (seismotektonisch- en tweekonebronmodel) beschreven in §4.5.4.2.3, met elk een gewicht van 0,5.
- **Mmax:** voor elke bronzone worden 4 mogelijke waarden voor de maximale magnitude beschouwd om rekening te houden met onzekerheden..
- **MFD:** Voor elke bronzone zijn 25 MFD's beschouwd op basis van een uitgebreide analyse waarin verschillende onzekerheden werden meegenomen (zie §4.5.4.2.3).

- Grondbewegingsmodel:** dit aftakkingsniveau omvat de 5 geselecteerde GMPE's in §4.5.4.2.4. Op deze manier verkrijgen we dus 500 verschillende eindtakken (4 Mmax-modellen × 25 MFD-modellen × 5 GMPE-modellen) voor elke bronzone. Het bemonsteren van de logische boom bestaat dus uit de willekeurige selectie van een bronzoneringsmodel, gevolgd door willekeurige selectie van één van de 500 verschillende mogelijkheden voor elke bron in dat bronzoneringsmodel, en tenslotte het berekenen van de gevarenkans voor deze specifieke combinatie. Voor elk bronzoneringsmodel zijn er bijgevolg  $500^n$  mogelijke uitkomsten, met n het aantal bronzones in het bronzoneringsmodel. In totaal zijn er dus  $500^{14}$  (voor het seismotektonisch model) +  $500^2$  (voor het tweezonemodel) =  $6 \times 10^{37}$  mogelijke uitkomsten, wat onmogelijk is om allemaal te berekenen. Het gemiddelde is berekend volgens de methode beschreven in 'Part I' §6.3 van [OD-046]. Om de percentielen te berekenen kunnen eindtakken van de logische boom samengesteld worden door combinatie van willekeurige monsters voor elke bronzone. Een gevoeligheidstest geeft aan dat 10 000 willekeurige monsters voldoende zijn om betrouwbare percentielen te berekenen (zie Part I §6.3 van [OD-046]).

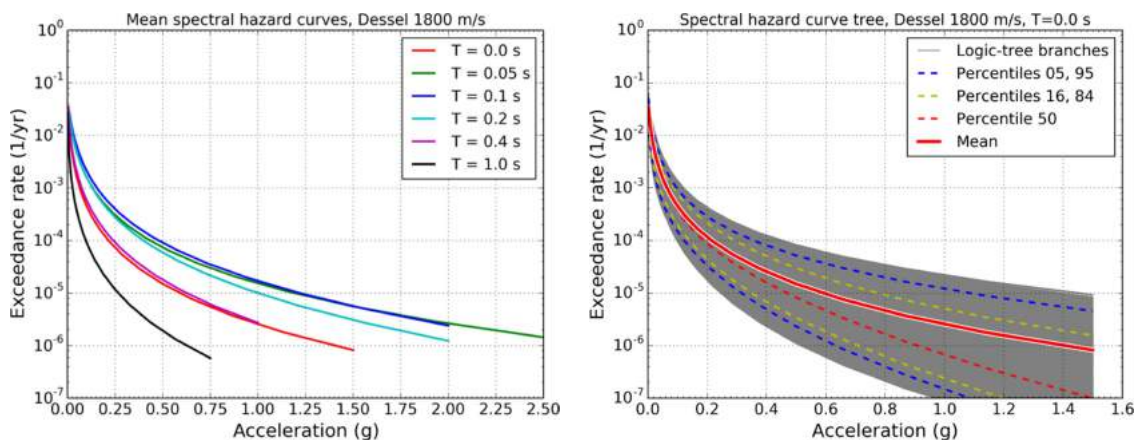
Het volledige PSHA-model werd opgebouwd en berekend met Python-code die door de KSB zelf werd ontwikkeld bovenop de kernmodule *oq-hazardlib* van de open-source PSHA-software OpenQuake [R4-92].

#### 4.5.4.2.5 Resultaten

##### Gevarenkanscurves

In een eerste stap werden gevarenkanscurves berekend die de overschrijdingsfrequentie weergeven in functie van de acceleratie voor de verschillende spectrale periodes. De gemiddelde curves voor PGA en vijf bijkomende spectrale periodes zijn weergegeven in Figuur 4 - 53.

Tabel 4 - 37 toont de gemiddelde PGA-waarden die uit de PGA-curve werden geïnterpoleerd voor de terugkeerperiodes van 1225, 8575 en 20 000 jaar. Deze percentielen vertegenwoordigen dus de epistemische onzekerheid.



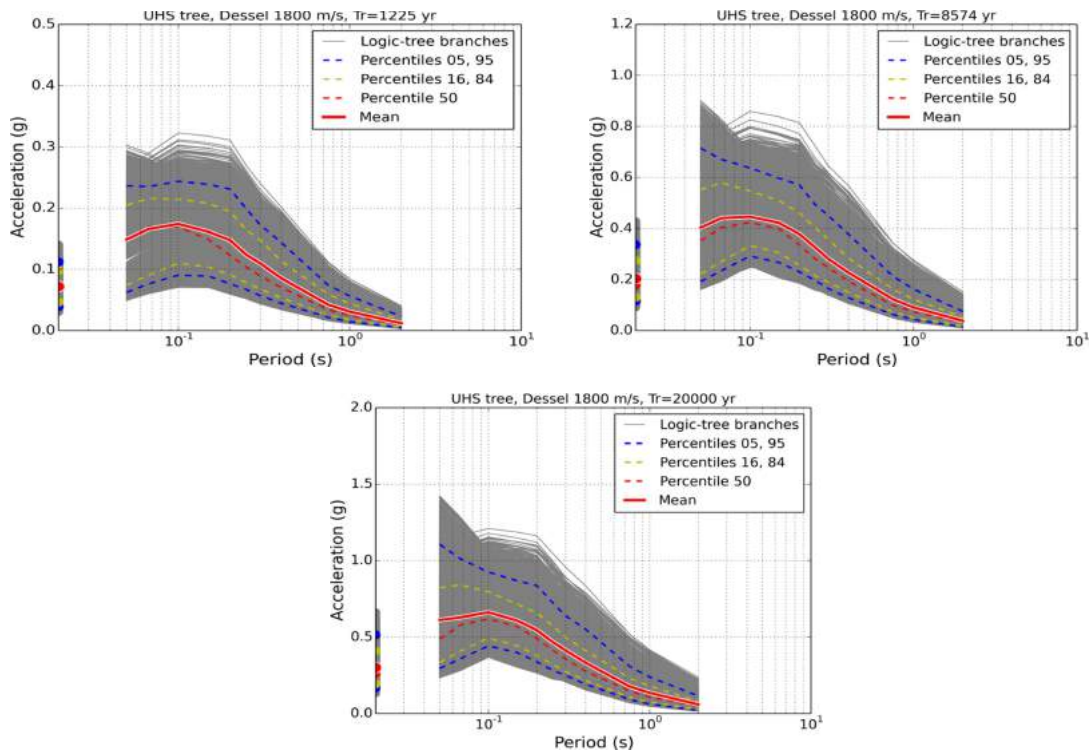
Figuur 4 - 53: Links: Gemiddelde gevarenkanscurves berekend voor PGA (T=0 s) en 5 andere spectrale periodes; rechts: PGA-gevarenkanscurves voor 10 000 individuele eindtakken van de logische boom, samen met hun gemiddelde en geselecteerde percentielen

Tabel 4 - 37: Gemiddelde en geselecteerde percentielen van de PGA voor verschillende terugkeerperiodes

Terugkeer-periode (a)	Gemiddelde (g)	P5 (g)	P16 (g)	P50 (g)	P84 (g)	P95 (g)
1225	0,072	0,039	0,046	0,070	0,098	0,112
8575	0,204	0,116	0,131	0,178	0,275	0,337
20000	0,301	0,170	0,195	0,262	0,409	0,515

### Uniforme-gevarekansspectra

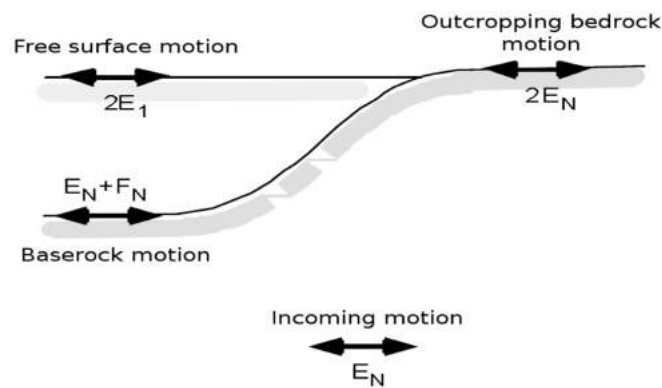
Wanneer we de gevarekanscurves voor alle beschouwde spectrale periodes interpoleren bij een bepaalde terugkeerperiode verkrijgen we uniforme-gevarekansspectra. De responspectra die op deze manier werden bekomen voor de beschouwde terugkeerperiodes zijn weergegeven in Figuur 4 - 54. Deze spectra beschrijven dus de respons (piekversnelling) voor verschillende spectrale periodes die gemiddeld éénmaal overschreden wordt tijdens de overeenkomende terugkeerperiode, in het geval dat de harde sokkel zou dagzomen. Vooral bij korte spectrale periodes ( $T < 0,1$  s) is de variatie zeer groot. De eindtakken met hogere acceleraties zijn deze waarin hardrock-GMPE's worden gebruikt.



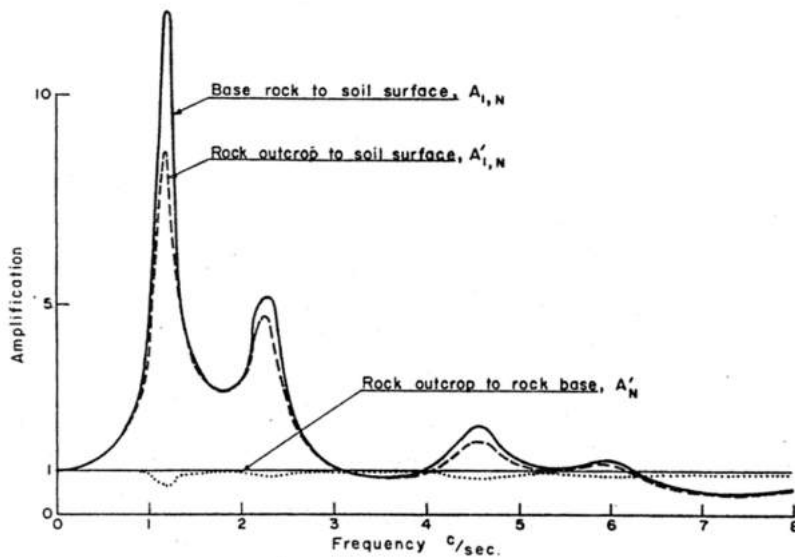
Figuur 4 - 54: Uniforme-gevarekansspectra (UHS) voor 10 000 individuele eindtakken van de logische boom, samen met hun gemiddelde en geselecteerde percentielen. Links boven: terugkeerperiode 1225 a; rechts boven: terugkeerperiode 8575 a; onder: terugkeerperiode 20 ka. Zo bedraagt de versnelling voor een frequentie van 1Hz ( $10^0$  s) voor de respectieve terugkeerperiodes 0.03 g, 0.08 g en 0.13 g.

#### 4.5.4.3 Modelling en experimentele bepaling van de spectrale transferfunctie

De uniforme-gevarekansspectra uit §4.5.4.2.5 houden geen rekening met site-effecten en hebben betrekking op het geval waarbij de harde sokkel dagzoomt aan het aardoppervlak. Om het responspectrum te bepalen aan het oppervlak van een site waar de sokkel bedekt wordt door sedimentlagen, wordt de zogenaamde transferfunctie berekend. Een transferfunctie geeft de verhouding weer tussen de verplaatsingsamplitudes van seismische golven aan de top van twee verschillende lagen. In ons geval moeten we dus de transferfunctie bepalen tussen de top van de sedimentkolom en de dagzomende harde sokkel (respectievelijk 'free surface' en 'outcropping bedrock' in Figuur 4 - 55). Merk op dat dit niet hetzelfde is als tussen het oppervlak en de top van de begraven sokkel ('baserock' in Figuur 4 - 55). Het verschil tussen beide transferfuncties wordt geïllustreerd in Figuur 4 - 56.



Figuur 4 - 55: Schematische weergave van een siteresponsanalyse (Bardet, Ichii and Lin, 2000).  $E_m$ ,  $F_m$ : amplitude van de invallende en van de gereflecteerde golf in laag m; Laag N: harde sokkel; Laag 1: oppervlaktelaag. Aan elk vrij oppervlak moet de schuifspanning gelijk zijn aan nul, wat impliceert dat de amplitudes van de invallende en de gereflecteerde golf er gelijk zijn (i.e.,  $E_N = F_N$  en  $E_1 = F_1$ )



Figuur 4 - 56: Transferfuncties tussen verschillende niveaus in een 1D-lagenmodel [R4-93].



In 'Part II' van [OD-046] is de transferfunctie op twee verschillende manieren bepaald: door modellering op basis van een 1D-lagenmodel ('Part II', §1 van [OD-046]) en op een experimentele manier met behulp van een boorgatseismometer en een seismometer aan het oppervlak ('Part II', §1.2 van [OD-046]). De experimentele transferfunctie komt overeen met de transferfunctie tussen 'baserock' en oppervlak maar wordt daarnaast ook verstoord door oppervlakteruis. Toch is de bepaling ervan zinvol om de gemodelleerde transferfunctie te valideren. Het is deze laatste die gebruikt zal worden om finaal de oppervlakteresponspectra te berekenen in §4.5.4.4.

### Lineaire versus equivalent-lineaire modellering

Er bestaan verschillende methoden om de respons van een horizontaal gelaagd systeem op verticaal propagerende schuifgolven te berekenen. De eenvoudigste methode bestaat erin het sediment als een lineair (visco)elastisch materiaal te modelleren. Elke laag wordt dan, naast dikte en dichtheid, gekarakteriseerd door een invariabele schuifmodulus (of schuifgolfsnelheid) en demping (of kwaliteitsfactor) voor schuifgolven. De respons van dergelijk lineair systeem kan worden berekend met de zogenaamde reflectiviteitstheorie ([R4-94], [R4-95]), waarbij alle mogelijke reflecties, transmissies, modeconversies enz. in rekening gebracht worden.

Een meer geavanceerde methode is equivalent-lineaire modellering, waarbij rekening gehouden wordt met niet-lineair gedrag van losse sedimentlagen. Niet-lineair gedrag impliceert dat de schuifmodulus en demping onder cyclische belasting afhangen van het niveau van deformatie dat het sediment ondergaat. Naarmate de deformatie toeneemt, vertoont sediment typisch een verslapping (afname van de schuifmodulus) en een toenemende demping, wat zich manifesteert in een toenemende hysteresis in de relatie tussen spanning en deformatie.

Vergelijking tussen beide benaderingen voor de site te Dessel heeft aangetoond dat lineaire modellering eerder conservatief is, d.w.z. dat hogere amplificaties worden voorspeld dan wanneer men rekening zou houden met niet-lineair gedrag (op basis van approximatieve degradatiecurves uit de literatuur). Daarom beschouwen we verder alleen lineair-elastische modellering op basis van een ééndimensionaal lagenmodel.

### Lagenmodellen

De constructie van elastische lagenmodellen voor de sedimentaire deklagen boven de Krijtsokkel op een diepte van 608,7 m is grotendeels gebaseerd op twee diepe boringen in de omgeving van de bergingssite: ON-Dessel-1 op 500 m van de bergingssite, en ON-Mol-1 op ongeveer 1,5 km. Boring ON-Dessel-1 reikt tot aan de top van de Paleocene Formatie van Houthem, die lithologisch bij het Krijt wordt gerekend; ON-Mol-1 reikt iets minder diep, tot aan de top van de Paleocene Formatie van Heers. Boven dit niveau kunnen alle lagen gecorreleerd worden tussen de twee boringen. Meer bepaald werd gebruik gemaakt van de volgende geotechnische gegevens:

- Schuifgolfsnelheid ( $V_s$ ): afhankelijk van de diepte werden hiervoor verschillende gegevens gebruikt [R4-96]:
  - ▶ Ondiepe lagen (tot 17,5 m diepte): gegevens afkomstig van metingen met seismische arrays op de bergingssite door TNO [R4-97];
  - ▶ Interval 38,2 – 608,7 m: schuifgolfsnelheden gemeten op basis van VSP-metingen in boorgat ON-Dessel-1 [R4-98] en ON-Mol-1 [R4-99]; voor elk stratigrafisch niveau in de boorbeschrijving werd het gemiddelde van de twee boorgatmetingen genomen;

- ▶ Voor de ontbrekende intervallen: extrapolatie uit andere boringen in het Kempens Bekken, o.a. de boring van Merksplas [R4-100] op basis van lithostratigrafie.
- ▶ Voor de sokkel: nieuwe  $V_S$ -metingen verricht in opdracht van NIRAS (zie §4.5.4.2.3).
- **Dichtheid:** bij gebrek aan voldoende gegevens is deze parameter gebaseerd op een empirische relatie op basis van  $V_S$  en diepte [R4-101];
- **Kwaliteitsfactor voor schuifgolven:** deze parameter is het moeilijkst te bepalen, maar kon toch achterhaald worden voor verschillende intervallen:
  - ▶ Op basis van het hoogfrequente deel van de experimenteel bepaalde transferfunctie voor de volledige sedimentkolom en voor twee intervallen: tussen top sokkel en HADES-URF (op een diepte van 223 m in het Putte Lid van de Boomse Klei) en tussen HADES-URF en het oppervlak;
  - ▶ Op basis van VSP-metingen (*Vertical Seismic Profiling*) in boorgat Dessel-1 [R4-98] tussen het oppervlak (eigenlijk in een put met een diepte van 1,5 m) en vier verschillende dieptes (35, 250,5, 335,5 en 605,5 m).

Op basis van deze gegevens zijn er drie verschillende elastische lagenmodellen opgesteld voor de bergingsite te Dessel, aangeduid als modellen A, B en C. Model A (Tabel 4 - 38) is een vereenvoudigd model met slechts vijf lagen. Deze lagen komen overeen met de vier intervallen waarvoor de kwaliteitsfactor kon worden bepaald op basis van VSP-metingen, aangevuld met een toplaag van 1,5 m. De grenzen van deze lagen zijn arbitrair en komen niet overeen met belangrijke stratigrafische grenzen, met uitzondering van de top van de seismische sokkel. Lagenmodellen B en C (Tabel 4 - 39) zijn meer gedetailleerde modellen waarin de lagen overeenkomen met de verschillende stratigrafische eenheden (formatie of lid) in boorgat ON-Dessel-1. De dikte van deze lagen is vrij nauwkeurig bekend. De twee modellen verschillen enkel in de manier waarop de kwaliteitsfactor (die enkel voor grotere intervallen gekend is) verdeeld werd over de verschillende lagen. Dikte, schuifgolfsnelheid en dichtheid zijn dus identiek in beide modellen.

**Tabel 4 - 38: Elastische parameters voor lagenmodel A. Legende:  $\rho$  – dichtheid; QS – kwaliteitsfactor voor schuifgolven**

Stratigrafie	$V_S$ (km/s)	$\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Dikte (m)	Qs ( )
Quartair (droog)	200,0	1,537	1,5	1,9
Quartair - Diest	307,6	1,941	34,0	26,8
Diest - Boom, Putte	575,5	1,988	215,0	29,4
Boom, Putte - Maldegem, Wemmel	576,6	1,960	85,0	33,7
Maldegem, Wemmel - Heers, Orp	752,3	2,018	270,0	15,4
Danian, Houtem (sokkel)	1813,0	2,305	30,0	18,4
<b>Relatieve standaard-deviatie</b>	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,20</b>

Tabel 4 - 39: Elastische parameters voor lagenmodellen B en C. Legende zoals in Tabel 4 - 40.

Stratigrafie	V <sub>s</sub> (km/s)	ρ (kg/dm <sup>3</sup> )	Dikte (m)	Model B	Model C
				Q <sub>s</sub> ( )	Q <sub>s</sub> ( )
Kwartair (droog)	200,8	1,537	0,8	5,5	3,1
Kwartair	199,5	1,922	1,4	5,5	3,0
Mol, Maatheide	246,6	1,946	2,0	7,2	4,6
Mol, de Maat	240,6	1,902	2,0	6,9	4,4
Mol, Donk2	268,4	1,919	2,0	8,0	5,4
Mol, Donk1	325,3	1,948	9,4	10,2	7,8
Mol, Donk0	321,9	1,918	2,4	10,1	7,7
Kasterlee	338,4	1,919	8,0	10,7	8,5
Diest	602,2	2,051	90,7	22,5	26,2
Dessel	618,2	2,021	21,0	23,2	27,6
Berchem	680,7	2,045	24,0	26,3	33,3
Voort	634,2	2,012	6,0	24,0	29,0
Eigenbilzen	574,7	1,970	19,5	21,2	23,9
Boom, Boeretang	500,0	1,911	24,5	17,7	18,2
Boom, Putte	511,6	1,908	48,0	18,2	19,0
Boom, Terhagen	590,2	1,951	15,0	21,9	25,2
Boom, Belsele-Waas	583,3	1,943	13,0	21,6	24,6
Zelzate, Ruisbroek	658,6	1,985	14,5	25,2	31,2
Maldegem, Zomergem	655,7	1,981	1,5	25,1	30,9
Maldegem, Onderdale	654,0	1,978	16,5	25,0	30,8
Maldegem, Asse	603,3	1,946	9,5	22,5	26,3
Maldegem, Wemmel	682,9	1,989	8,0	26,4	33,5
Lede	775,6	2,034	16,0	31,1	42,9
Brussel	832,0	2,057	12,0	34,0	49,3
Tielt, Egem	606,8	1,939	7,0	22,7	26,6
Tielt, Kortemark	638,2	1,956	9,5	24,2	29,3
Kortrijk, Aalbeke	560,3	1,906	8,5	20,5	22,7
Kortrijk, Mons-en-Pévèle	702,9	1,985	37,5	27,4	35,4
Kortrijk, St-Maur	641,5	1,946	35,0	24,4	29,6
Hannut, Grandglise	629,4	1,934	33,5	23,8	28,5
Hannut, Halen	811,0	2,021	54,5	32,9	46,9
Hannut, Waterschei	889,1	2,049	29,5	37,0	56,1
Heers, Gelinden	1613,5	2,266	15,5	79,5	180,0
Heers, Orp	1201,8	2,156	10,5	54,5	101,1
Danian, Houthem (sokkel)	1813,0	2,305	30,0	18,4	18,4
<b>Relatieve standard deviatie</b>	<b>0,14</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,29</b>	<b>0,29</b>

### Implementatie van de berekeningen

De lineair-elastische modellering werd uitgevoerd met Transfer1D, een programma dat werd ontwikkeld aan de KSB [R4-102] op basis van het FORTRAN-programma ERZSOL3 van [R4-96]. Transfer1D berekent de transferfunctie tussen het oppervlak en de dazomende sokkel voor een 1D-lagensysteem. Als invoerparameters moeten voor elke laag in het model de dikte, de densiteit, de schuifgolfsnelheid en de kwaliteitsfactor voor schuifgolven opgegeven worden. Om rekening te houden met onzekerheden op deze parameters voert Transfer1D een Monte-Carlosimulatie uit met de opgegeven waarde als gemiddelde en een vaste relatieve standaarddeviatie voor elke parameter. De relatieve standaarddeviaties zijn vermeld in Tabel 4 - 40 en Tabel 4 - 41. Op deze manier werden 100 verschillende lagenmodellen gegenereerd, waarvan voor elk de spectrale transferfunctie werd berekend.

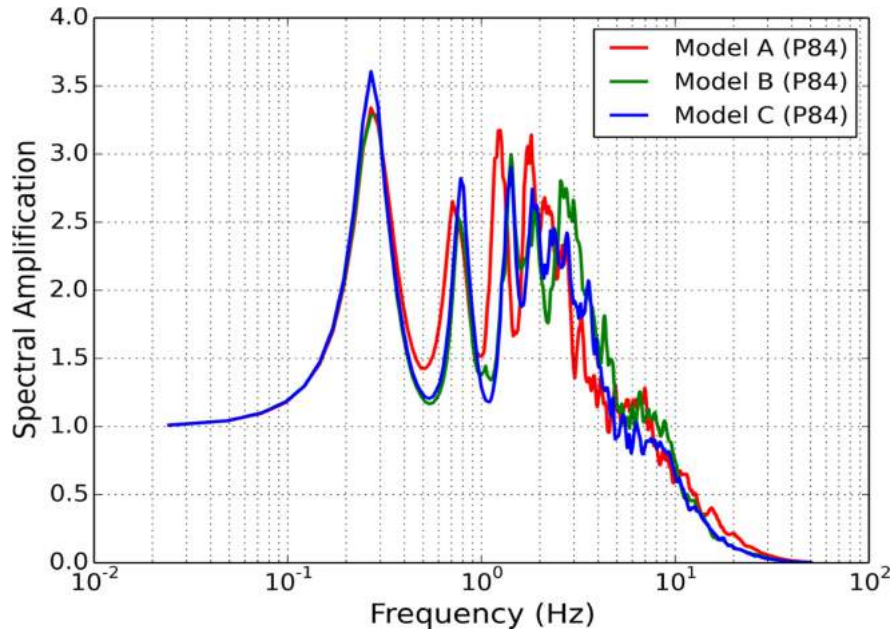
Het resultaat van de berekeningen bestaat uit 100 spectrale transferfuncties (in complexe getallen). De complexe getallen bevatten informatie over zowel de absolute waarde of magnitude  $|A(\omega)|$  en de fase  $\Phi(\omega)$  in functie van de frequentie  $\omega$ . In de meeste applicaties is men enkel geïnteresseerd in de magnitude en wordt het gemiddelde en de percentielen berekend op basis van de magnitudes van de individuele transferfuncties. De procedure die wordt gevolgd om het oppervlakteresponspectrum te berekenen (§4.5.4.4) vereist echter dat de transferfunctie in complexe getallen gegeven wordt. Hoewel het mathematisch mogelijk is om het gemiddelde, de mediaan en de standaarddeviatie van een reeks van complexe getallen te berekenen, blijken deze echter geen echte fysische betekenis te hebben. Dit is vooral het geval voor de fase. De oplossing bestaat er daarom in om eerst de mediaan of het 84<sup>e</sup> percentiel van de magnitudes van de gemodelleerde transferfuncties te berekenen, en daarna de overeenkomende fase te reconstrueren. Voor een algemeen systeem kan de fase niet op een unieke manier worden achterhaald op basis van de magnitude alleen. Dit kan echter wel indien we veronderstellen dat we te maken hebben met een zogenaamd minimum-fasesysteem. Voor dergelijke systemen is er een verband tussen fase en magnitude:

$$\Phi(\omega) = -H \{ \ln |A(\omega)| \}$$

In deze formule staat  $H \{ F(x) \}$  voor de Hilbert-transformatie van functie  $F(x)$ . Een minimum-fasesysteem kan worden beschouwd als een systeem dat het snelst verval, of ook een systeem waarbij de initiële energie het grootst is. Dit is een realistische aanname voor de respons van een sedimentkolom bij de propagatie van elastische golven.

### Resultaten

Als eindresultaat tonen we het 84<sup>e</sup> percentiel van de transferfuncties berekend op basis van de drie beschouwde lagenmodellen in Figuur 4 - 57. Alle transferfuncties vertonen een eerste piek met een amplificatie  $> 3$  bij een frequentie van 0,28 Hz. Deze piek wordt bepaald door het impedantiecontrast tussen sokkel en sedimentaire lagen. Verder vertonen ze een vijftal pieken tussen 0,8 en 3 – 4 Hz met iets lagere amplificaties (2,5 – 3). Bij de transferfunctie voor lagenmodel A wijken de posities van deze pieken af t.o.v. de twee andere modellen. Tot slot zakt de amplificatie onder 1 tussen 5 en 9 Hz.



**Figuur 4 - 57: Lineair-elastische transferfuncties berekend op basis van de drie lagenmodellen: 84e percentiel van 100 berekeningen waarbij de elastische parameters van elke laag willekeurig gevarieerd werden binnen de respectievelijke onzekerheden**

#### 4.5.4.4 Bepaling van de responspectra aan het aardoppervlak

De responspectra van de horizontale versnelling aan het grondoppervlak en de procedure om het te bepalen zijn hieronder in het kort weergegeven [R4-103]. De responspectra van de verticale versnelling worden bekomen door de corresponderende ordinaten van de horizontale responspectra te herschalen naar twee-derde over het volledige frequentiebereik.

##### 4.5.4.4.1 Convolutieproces

###### Responspectra aan de seismische sokkel

De beschouwde sokkel-responspectra voor elke terugkeerperiode met een dempingsverhouding van 5% worden gegeven door het gemiddelde van de logische boom zoals bepaald in ‘resultaten’ van §4.5.4.2.5 (Figuur 4 - 54).

###### Synthetisch accelerogram

Op basis van elk sokkel-responspectrum met 5% demping worden drie synthetische accelerogrammen  $a_b(t)$  gegenereerd.

###### Fourier spectra aan de seismische sokkel

Het Fourier spectrum  $\hat{a}_b(\omega)$  van ieder synthetisch accelerogram aan de sokkel wordt vervolgens berekend.

#### Fourier spectra aan de oppervlakte

Frequentie per frequentie wordt de complexe waarde van de Fourier spectra  $\hat{a}_b(\omega)$  aan de sokkel vermenigvuldigd met de complexe waarde van iedere site-transferfunctie om aldus een Fourier spectrum aan de oppervlakte  $\hat{a}_s(\omega)$  te bekomen.

#### Synthetisch accelerogram aan de oppervlakte

De inverse Fourier transformatie van elk Fourier spectrum aan de oppervlakte  $\hat{a}_s(\omega)$  wordt berekend. De reële delen van het complexe resultaat geven een synthetische accelerogram  $a_s(t)$  aan de oppervlakte dat overeenkomt met het beschouwde synthetische accelerogram aan de sokkel  $a_b(t)$  en de beschouwde site transferfunctie.

#### Oppervlakte responspectra

Als laatste wordt het responspectrum van elk synthetisch accelerogram aan de oppervlakte berekend voor een demping van 5% (zelfde waarde als de sokkel-responspectra).

#### 4.5.4.4.2 Ontwerp oppervlakte responspectra

Voor elke aardbeving wordt een 'Ontwerp oppervlakte responspectrum' met 5% demping gedefinieerd die een enveloppe vertegenwoordigt bestaande uit 4 lineaire segmenten (op log-log schaal), van de gemiddelden van de drie oppervlakte responspectra die berekend werden voor elke site specifieke transferfunctie en het responspectrum op de sokkel.

Voor dempingen verschillend van 5% wordt het ontwerp oppervlakte responspectrum bekomen door de knikpunten van de segmenten met de 5% demping te vermenigvuldigen met de omrekeningsfactoren uit Tabel 4 - 40.

Tabel 4 - 40: Correctiefactoren voor verschillende dempingen

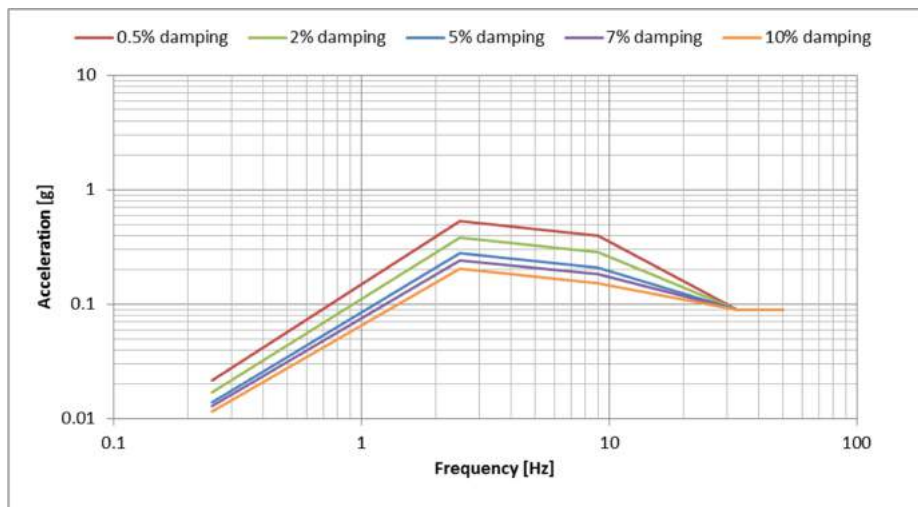
Demping (%)	Correctie factoren voor de controle punten			
	33 Hz	9 Hz	2,5 Hz	0,25 Hz
0,5	1,00	1,90	1,90	1,56
2	1,00	1,36	1,36	1,22
7	1,00	0,87	0,87	0,92
10	1,00	0,73	0,73	0,83

De ontwerp oppervlakte responspectra voor de verschillende terugkeerperiodes zijn gegeven in Tabel 4 - 41

Tabel 4 - 42 en Tabel 4 - 43, en in Figuur 4 - 58, Figuur 4 - 59 en Figuur 4 - 60.

Tabel 4 - 41: Waarden van de ontwerp oppervlakte responsspectra bij verschillende dempingen voor een terugkeerperiode van 1225 jaar

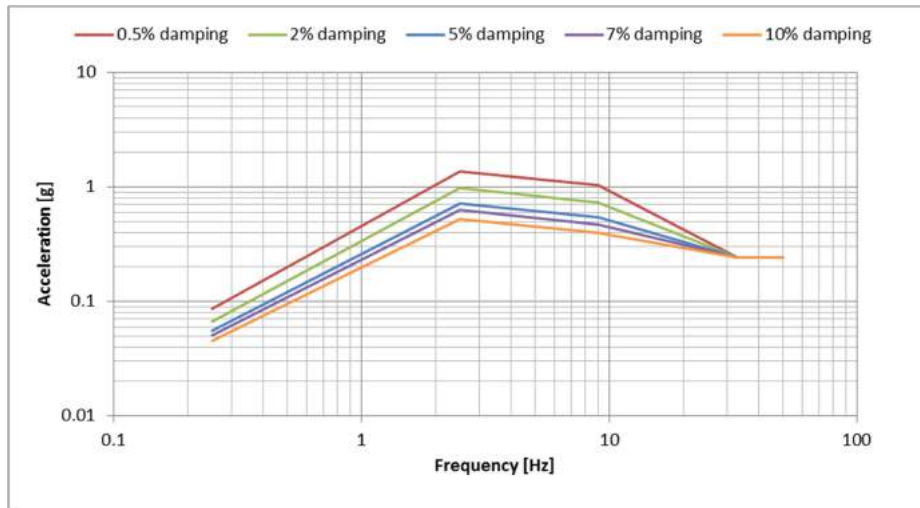
Demping (%)	Spectrale waarden voor de controle punten [g]			
	33 Hz	9 Hz	2,5 Hz	0,25 Hz
0,5	0,090	0,399	0,532	0,022
2	0,090	0,286	0,381	0,017
5	0,090	0,210	0,280	0,014
7	0,090	0,183	0,244	0,013
10	0,090	0,153	0,204	0,012



Figuur 4 - 58: Ontwerp oppervlakte responsspectra voor verschillende dempingen voor een terugkeerperiode van 1225 jaar.

Tabel 4 - 42: Waarden van de ontwerp oppervlakte responsspectra bij verschillende dempingen voor een terugkeerperiode van 8575 jaar.

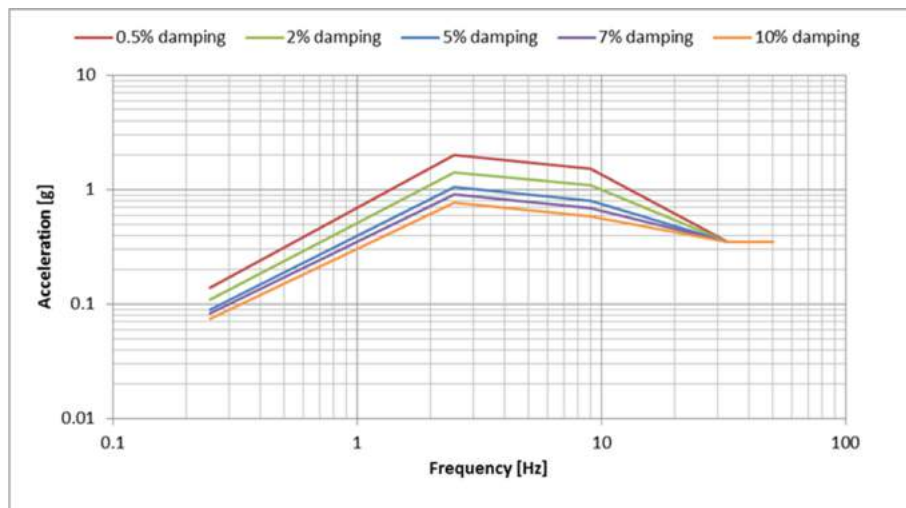
Demping (%)	Spectrale waarden voor de controle punten [g]			
	33 Hz	9 Hz	2,5 Hz	0,25 Hz
0,5	0,240	1,026	1,368	0,086
2	0,240	0,734	0,979	0,067
5	0,240	0,540	0,720	0,055
7	0,240	0,470	0,626	0,051
10	0,240	0,394	0,526	0,046



Figuur 4 - 59: Ontwerp oppervlakte responspectra voor verschillende dempingen, terugkeerperiode van 8575 jaar.

Tabel 4 - 43: Waarden van de ontwerp oppervlakte responspectra bij verschillende dempingen voor een terugkeerperiode van 20 000 jaar

Demping (%)	Spectrale waarden voor de controle punten [g]			
	33 Hz	9 Hz	2,5 Hz	0,25 Hz
0,5	0,350	1,520	1,995	0,140
2	0,350	1,088	1,428	0,110
5	0,350	0,800	1,050	0,090
7	0,350	0,696	0,914	0,083
10	0,350	0,584	0,767	0,075



Figuur 4 - 60: Ontwerp oppervlakte responspectra voor verschillende dempingen, terugkeerperiode van 20 000 jaar.



#### **4.5.5 Conclusie**

De site en zijn omgeving vertonen een stabiele geologie. De nabijheid van de Roerdal Slenk brengt de stabiliteit van de regio niet in gevaar over de beschouwde tijdspannes. Onderzoek naar de breuk van Rauw toont aan dat de breuk zich in een ‘slapende periode’ bevindt. De seismische activiteit in de regio is beperkt, en als deze zich zou voordoen zal dit in hoofdzaak gebeuren langs de randbreuken van de slenk, en dan vooral de oostelijke hoofdrandbreuk (Peel). De ondergrond van de bergingsite bestaat uit de dichtgepakte zanden van Mol die een voldoende draagkracht garanderen voor de bergingsinstallatie en de zettingen beperken (zie [HS08], §8.5.4.3 en §8.3.3.2). De ondiepe geologie (Neogeen) werd in kaart gebracht, de diepte en dikte van de verschillende formaties is rond de bergingsite vrij constant.

De niveaus van aardbevingen zijn voldoende nauwkeurig bestudeerd om een robuuste berging te kunnen ontwerpen.

## 4.6 Hydrologie en hydrogeologie

### 4.6.1 Hydrologie (oppervlaktewater)

#### 4.6.1.1 Regionale hydrologie

##### 4.6.1.1.1 Algemene karakteristieken van het Netebekken

De belangrijkste hydrologische eenheden van het Netebekken zijn opgesomd in Figuur 4 - 61. De totale oppervlakte van het Netebekken bedraagt 1 673 km<sup>2</sup> (inclusief de Beneden-Nete) en situeert zich in het noordoosten van Vlaanderen [R4-104]. Het grootste deel van het Netebekken ligt in de provincie Antwerpen, het zuidoosten van het bekken ligt in de provincie Limburg en het zuiden is voor een fractie gelegen in de provincie Vlaams-Brabant. Hydrografisch wordt het Netebekken in het noorden en het oosten begrensd door het Maasbekken, in het zuiden door het Demerbekken, in het zuidwesten door het Dijlebekken en in het westen door het Beneden-Scheldebekken. Het volledige Netebekken watert af in zuidwestelijke richting naar het Beneden-Scheldebekken en behoort zo tot het stroomgebied van de Schelde.

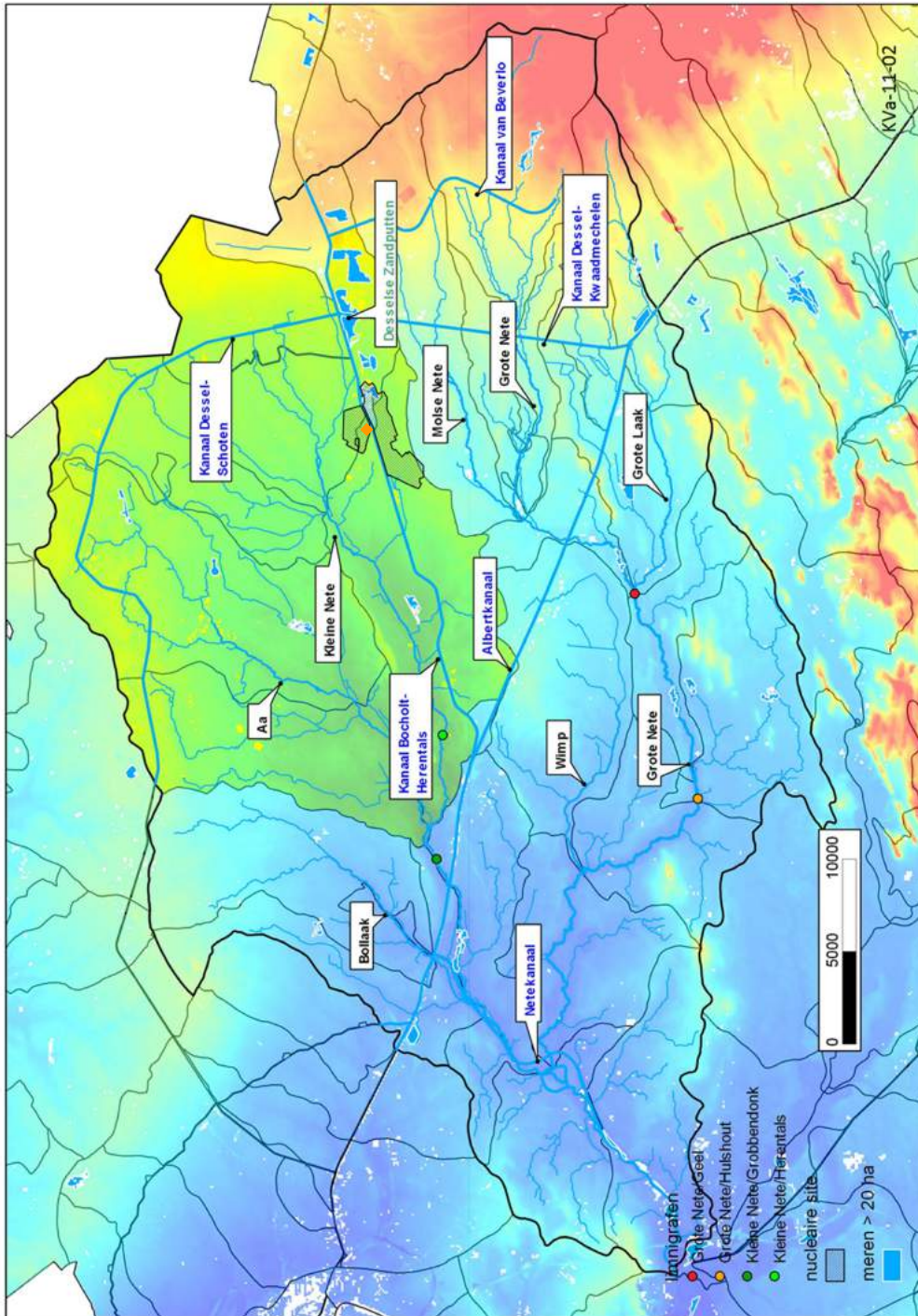
Het Netebekken bestaat voornamelijk uit twee grote deelstroomgebieden: dat van de Kleine Nete (812 km<sup>2</sup>) en dat van de Grote Nete (726 km<sup>2</sup>). De Kleine Nete en de Grote Nete vloeien in Lier samen en vormen dan de Beneden-Nete, die op haar beurt in de Rupel uitmondt. Belangrijke zijwaterlopen van de Grote Nete zijn de Molse Nete, de Grote Laak en de Wimp. De Bollaak en de Aa zijn de voornaamste zijwaterlopen van de Kleine Nete.

Een aantal kanalen doorkruisen het Netebekken. Het Albertkanaal verbindt de Antwerpse haven met de Maas in Luik. Het kanaal Bocholt-Herentals, het Kanaal Dessel-Kwaadmechelen, het Kanaal Dessel-Schoten en het Netekanaal zijn verbonden met het Albertkanaal. Voor de bergingssite is het kanaal Bocholt-Herentals van belang. Dit kanaal heeft een gebetonnerde bedding, maar verliest toch water ter hoogte van de site. Deze verliezen hebben een niet onbelangrijke invloed op de lokale grondwaterstand (zie ook §4.6.2.7).

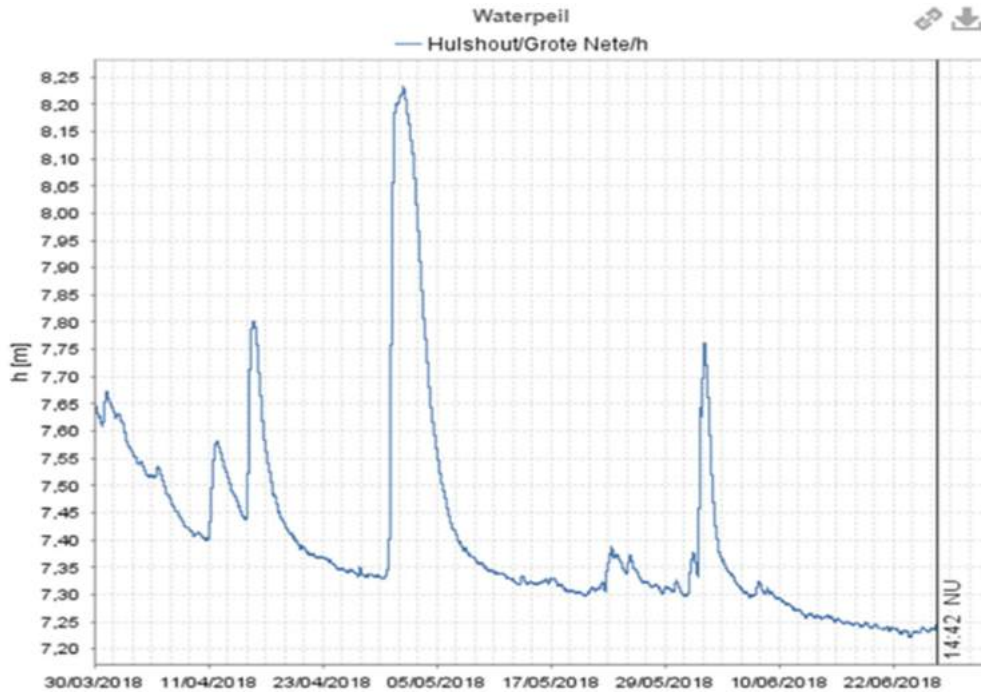
Belangrijke stilstaande waters zijn de al dan niet afgewerkte zandontginningsplassen in Mol, Dessel en Lommel. Daarnaast telt het Netebekken verscheidene zwem- en recreatievijvers en een groot aantal visvijvers, waarvan er vele in de valleien liggen.

Het Netebekken kent een vrij vlak reliëf. De hoogte binnen het bekken varieert van 0 tot ongeveer 70 m TAW. De hoogste gebieden situeren zich in het oostelijke deel op de grens met het Maasbekken.

Door het vlakke reliëf en de zandige bodems - het Netebekken ligt grotendeels in de zandstreek - worden de waterlopen in het bekken gekenmerkt door brede valleien. De van nature overstroombare gebieden zijn dan ook zeer uitgestrekt. De zandige bodem en het kleine verval maken bovendien dat het aandeel van de basisafvoer van de waterlopen in het Netebekken in de totale afvoer relatief groot is (zie ook §4.6.2.9). Dit resulteert onder meer in kleinere piekdebieten, langere hoogwaterperiodes en een hydrogram dat gekenmerkt wordt door een dalende tak met een minder steil verloop (Figuur 4 - 62). Voor het Netebekken is de basisafvoer gemiddeld bijna 30% van het piekdebiet.



Figuur 4 - 61: Regionale oppervlaktewaterlichamen in het Netebekken met in het noordoosten het stroomgebied van de Kleine Nete tot Grobbendonk in het groen. Oranje ruit geeft de locatie weer van de bergingsite.



Figuur 4 - 62: Voorbeeld van een hydrogram van de Grote Nete te Hulshout.

#### 4.6.1.1.2 Stroomgebied van de Kleine Nete tot Grobbendonk

Geografisch behoort het stroomgebied van de Kleine Nete tot de Antwerpse Noorder- en Zuiderkempen. Het stroomgebied strekt zich uit van Ravels en Rijkvorsel in het noorden tot Mol en Geel in het zuiden, en van Grobbendonk in het westen tot Arendonk en Retie (Postel) in het oosten. Dit gebied beslaat een oppervlakte van ongeveer 812 km<sup>2</sup>. De Kleine Nete ontstaat aan de samenvloeiing van de Witte Nete en de Looiendse Nete (Figuur 4 - 63). De Witte Nete ontsprong oorspronkelijk in het noorden van de gemeente Mol, op de zuidwestelijke helling van de Kempense microcuesta. De eigenlijke bovenloop, de Waterstraalloop, is nu door zandwinningsputten van de rest van de rivier afgesneden. De Kleine Nete/Witte Nete ontspringt nu in de omgeving van de 'Miramar' zandput op een hoogte van ongeveer 25 m TAW. De meeste zijlopen van de Kleine Nete, waaronder de Aa en de Wamp, ontstaan op de steile zuidwestelijke tot zuidelijke helling van de Kempense microcuesta en zijn dus ten noorden van de Kleine Nete gelegen. Zij lopen meestal parallel en in zuidwestelijke richting. Kenmerkend voor de waterlopen gelegen ten zuiden van de Kleine Nete is het geringe afvoerdebiet.

De waterlopen van het Netebekken zijn laaglandbeken. Ze zijn van nature ondiep ingesneden, hebben een klein verval en een geringe stroomsnelheid. Hierdoor zullen ze reeds van in hun bovenloop een sterk meanderend verloop kennen. Deze waterlopen ontstaan zelden uit echte bronnen, maar worden gevoed door afvloeiing van neerslagwater en oppervlakkig grondwater (kwel), dat via een netwerk van grachten en sloten uiteindelijk samenvloeit in grotere waterlopen. Van nature is het beekwater dan ook relatief zuur (arm aan kalk), arm aan mineralen en weinig voedselrijk voor levende organismen. Er is wel voedselaanrijking door agrarische lozingen

zoals uitspoeling en insijpeling van drijf- en kunstmest uit landbouwgronden. Bovendien wordt het stroomgebied van de Kleine Nete doorkruist door de Kempische Kanalen, die voor aanrijking met kalkrijk Maaswater zorgen.

In de zomer groeien er heel veel waterplanten in de Kleine Nete. Hierdoor daalt de stroomsnelheid en stijgen de waterstanden niet alleen over de begroeide trajecten, maar ook verder stroomopwaarts.

Het stroomgebied van de Kleine Nete vertoont een vrij homogeen afvoergedrag (zie ook §4.6.2.9.2). Het ganse gebied wordt gekenmerkt door redelijk constante waarden voor de afvoercoëfficiënten (die de verhouding geven van het volume van de snelle afvoer op de totale neerslag) gaande van 20 tot 25%. Wel blijkt dat er een (lichte) oost-west gradiënt is in het afvoergedrag: opwaartse gebieden worden gekenmerkt door een hogere waarde voor de specifieke basisafvoer<sup>31</sup> en een hoger aandeel van basisafvoer in de totale afvoer (of een lagere waarde voor de run-off) in vergelijking met afwaartse gebieden [R4-105].

#### 4.6.1.2 Lokale hydrologie

##### 4.6.1.2.1 Inleiding

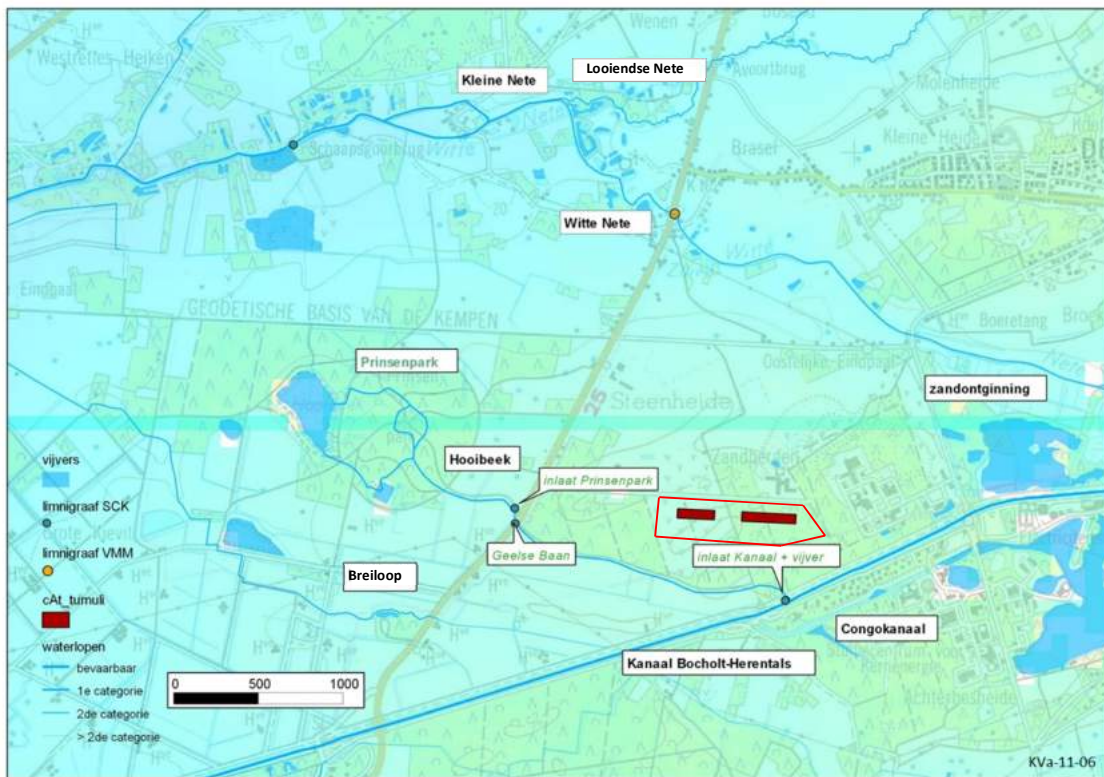
De lokale hydrologie in de buurt van de bergingsite te Dessel is weergegeven in Figuur 4 - 63.

De site is gelegen nabij de waterscheiding tussen het stroomgebied van de Breilooop en van de Witte Nete/Kleine Nete. Langs de zuidelijke grens van de site loopt de Hooibeek. Deze bevoeit de grachten en vijvers van het Provinciaal domein Prinsenpark met water van het Kanaal Bocholt-Herentals. De voeding wordt gestuurd met een schuifconstructie aan het kanaal. Stroomafwaarts de Geelsebaan treedt een verdeling op tussen water dat afgevoerd wordt naar het Prinsenpark en water dat een aantal vijvers voedt en vervolgens afgevoerd wordt naar de Breilooop. In het Prinsenpark wordt vanuit de Gertryvijver overtollig water afgevoerd langs een overlaatconstructie. Het water wordt langs een grachtenstelsel afgevoerd naar de Kleine Nete stroomopwaarts van de monding van de Breilooop. Vanuit de overige vijvers zijn er ook overlaatconstructies aanwezig naar de Breilooop. Deze treden echter pas in werking bij uitzonderlijke hoogwaterafvoer.

Langs de Witte/Kleine Nete zijn talrijke kleine vijvers aanwezig (Figuur 4 - 63). Deze vijvers worden gevoed door het grondwater. Een deel van de vijvers is in het verleden ontstaan door het steken van turf, maar anderen werden (soms illegaal) aangelegd in 'weekendzones'. De algemene interesse in weekendhuisjes neemt ondertussen sterk af, waardoor overheden en terreinbeherende verenigingen (i.h.b. Natuurpunt VZW) de gelegenheid krijgen om het landschap te herstellen, door vervallen constructies af te breken, vijvers te dempen en het oorspronkelijk reliëf te herstellen. De invloed van deze waterlichamen in de hydrogeologische berekeningen is besproken in §14.4.4.2.3.1 van HS14. Drie vijvers zijn ook opgenomen in het monitoringsprogramma (§16.4.5.6 van HS16).

---

<sup>31</sup> basisafvoer per eenheid van oppervlakte



Figuur 4 - 63: Lokale oppervlaktewaterlichamen met locatie van de meetpunten waar de waterhoogte in de rivieren wordt gemeten.

#### 4.6.1.2.2 Zandwinnings

Ten oosten van de bergingssite liggen er verschillende zandontginningen, waarvan sommigen nog actief zijn. De eerste officiële exploitatie van het kwartszand van Mol zou reeds van 1862 dateren [R4-188]. Het oudste ontginningsgebied situeert zich tussen Boeretang en het Zilvermeer en uit zich als een langgerekte aaneenschakeling van grote vijvers (Figuur 4 - 64). In deze zone is het voorkomen van de formatie beperkt door een scherpe zuidelijke en deels noordelijke begrenzing, in het centrale deel bedraagt de dikte ongeveer 25 m. Een tweede ontginningszone bevindt zich ten oosten van de breuk van Rauw, waar het zand dieper voorkomt en bedekt wordt door een tweede zandlaag (Maatheide zand, zie ook Figuur 4 - 155). In de derde ontginningszone, oostwaarts van de breuk van Reusel (zie ook Figuur 4 - 42 voor de ligging van de vermelde breuken), wordt ontginning bemoeilijkt door de steeds dikkere deklagen.

In Dessel, tegenover de site van Belgoprocess, zou de zandwinning volgens planning lopen tot 2049. Op dat ogenblik zal de maximale grootte van de zandput worden bereikt. Om de ontginning van deze put mogelijk te maken werd de Witte Nete noordwaarts verlegd en werd van de gelegenheid gebruik gemaakt om aan hermeandering te doen (Figuur 4 - 65).



Figuur 4 - 64: Locatie van het ontginningsgebied van het kwartsand van Mol. 1: Boeretang; 2: Zilvermeer; 3: Rauw; 4: ligging breuk van Reusel. De locatie van de site is weergegeven met een gele ruit.



Figuur 4 - 65: Verplaatsing van de Witte Nete ten gevolge van zandontginning inclusief hermeandering [OD-026]

#### 4.6.1.2.3 Debiet- en waterstandmetingen

In het gebied rond de site zijn zes meetpunten beschikbaar die driemaandelijks gegevens verstrekken aangaande waterpeilen en/of debieten (zie Figuur 4 - 63):

- overlaatconstructie op de Hooibeek aan de inlaat nabij het Kanaal;
- waterstandmeting op de vijver aan de Hooibeek ter hoogte van het Kanaal;
- overlaatconstructie op de Hooibeek aan de Geelsebaan aan inlaat van Prinsenpark;
- overlaatconstructie op irrigatie/drainagekanaal van Hooibeek naar Braselhoeve ('Geelse Baan');
- peil- en debietmeting op de Kleine Nete aan de Schaapsgoorbrug (limnigraaf SCK);
- peil- en debietmeting op de Witte Nete aan de Geelsebaan (limnigraaf VMM).

In feite wordt op deze plaatsen overal het peil gemeten, dat dan via een vast QH-verband<sup>32</sup> wordt omgezet naar een debietmeting. Voor de metingen op de Hooibeek werden speciale V-vormige overlaatconstructies gebouwd. Deze werden in het laboratorium gecalibreerd om tot een vast QH-verband te komen. De meetplaats op de Kleine Nete bevindt zich opwaarts van de Schaapsgoorbrug. Hier werden verschillende calibratiemetingen uitgevoerd om tot een vast QH-verband te komen [R4-108].

Voor de gemeten debieten op de Kleine Nete aan de Schaapsgoorbrug schatten we de onzekerheid groot in omwille van opstuwung door plantengroei in het groeiseizoen en door andere onvolkomenheden aan de meetplaats [R4-105].

Voor het meetpunt van de VMM op de Witte Nete is het QH-verband in de zomer eveneens onbetrouwbaar als gevolg van opstuwung door planten in de waterloop. Er zijn hier geen andere onvolkomenheden aan de meetplaats, zodat we ervan kunnen uitgaan dat de debieten gemeten in de winter betrouwbaar zijn.

De metingen op de Hooibeek zijn voorlopig gevalideerd tot en met november 2009. Deze resultaten zijn gebruikt in de analyses. In Tabel 4 - 44 en Tabel 4 - 45 worden voor de beschikbare meetpunten op de Hooibeek en de Kleine Nete de belangrijkste karakteristieken van debiet en waterstand gegeven sinds het begin van de metingen. Voor de Hooibeek beschouwen we de metingen vanaf november 2009 niet voor de berekeningen van de gemiddelde waterpeilen en debieten gezien de steeds groter wordende onzekerheid van de gegevens<sup>33</sup>.

**Tabel 4 - 44: Gemiddelde, minimale en maximale waterstand (TAW) voor de meetpunten op de Hooibeek en de Kleine Nete.**

Meetplaats	Gemiddelde waterstand (m)	Minimale waterstand (m)	Maximale waterstand (m)
Kleine Nete (Schaapsgoorbrug)	16,51	16,03	17,74
Witte Nete (Retie, VMM)	19,50	19,34	20,16
Hooibeek (inlaat, opwaarts)	24,84	24,42	25,05
Hooibeek (inlaat, afwaarts)	24,41	24,06	24,62
Hooibeek (drainagekanaal)	24,07	23,96	24,16
Hooibeek (Prinsenpark)	24,07	23,95	24,15

<sup>32</sup> Verband tussen het debiet en de waterstand in de rivier.

<sup>33</sup> Door technische problemen aan het meetpunt worden grotere fluctuaties van de metingen genoteerd.



Tabel 4 - 45: Gemiddeld, minimaal en maximaal debiet voor de meetpunten op de Hooibeek en de Kleine Nete.

meetplaats	Gemiddeld debiet (m³/s)	Minimaal debiet (m³/s)	Maximaal debiet (m³/s)
Kleine Nete (Schaapsgoorbrug) <sup>1</sup>	1,73	0,026	9,26
Witte Nete (Retie, VMM) (1993 – 2010)	0,67 <sup>2</sup>	0,09	8,87
Hooibeek (Inlaat)	0,08	0	0,155
Hooibeek (drainagekanaal)	0,021	0	0,084
Hooibeek (Prinsenpark)	0,044	6,5 10 <sup>-5</sup>	0,116

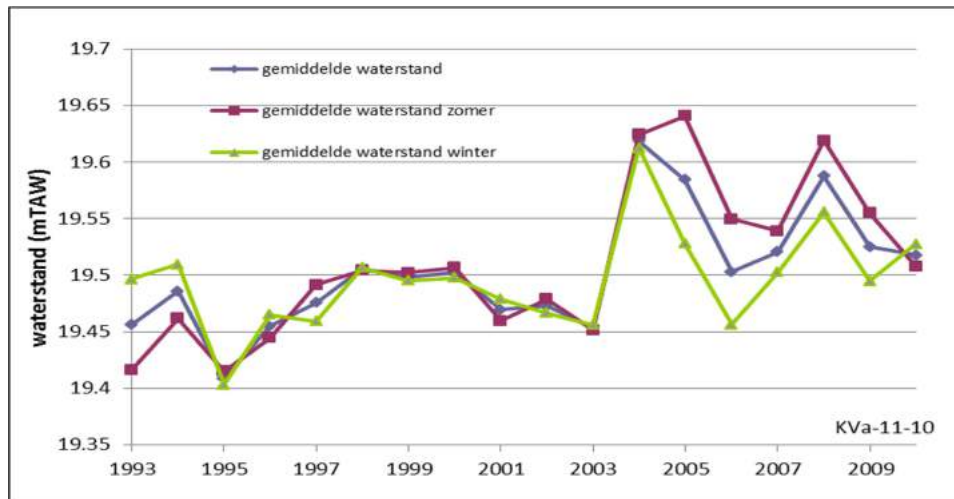
<sup>1</sup> debieten zijn berekend voor winterperiode (1/11 – 30/04), gedurende de periode 12/2007-05/2011

<sup>2</sup> debieten zijn berekend voor de periode 1993 – 2003

#### 4.6.1.2.4 Tijdsafhankelijke evolutie van de waterstand en het debiet

Voor de lokale hydrologie is er één meetpunt aanwezig met continue waterstand- en debietgegevens, namelijk het meetpunt van de VMM op de Witte Nete te Retie. De gegevens werden verkregen via [R4-109].

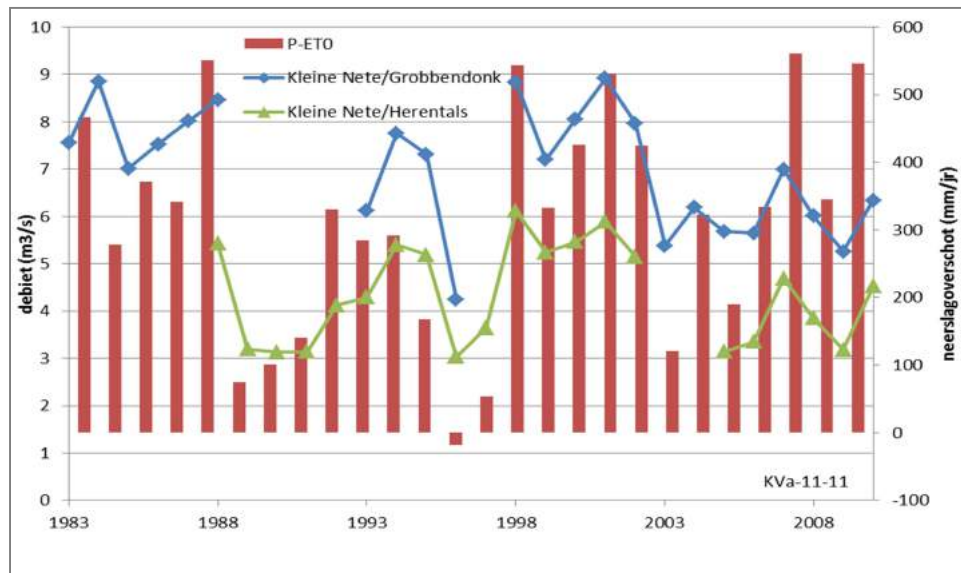
Figuur 4 - 66 toont de gemiddelde jaarlijkse waterstand op de Witte Nete te Retie vanaf 1993, samen met de gemiddelde waarden voor de zomerperiode (1 mei – 30 oktober) en de winterperiode (1 november – 30 april). Vanaf 2004 liggen de gemiddelde jaarlijkse waterstanden beduidend hoger dan ervoor. Een belangrijke reden hiervoor is de opkomende aanwezigheid van planten aangezien de gemiddelde waterstand voor de zomerperiode vanaf 2004 systematisch hoger ligt dan de gemiddelde waterstand in de winterperiode. Een tweede reden voor de verhoogde waterstand is de verlegging en hermeandering van de Witte Nete stroomafwaarts van het meetpunt in 2005 ten gevolge van de zandontginning (Figuur 4 - 65).



Figuur 4 - 66: Gemiddelde waterstand (jaarlijks, zomer, winter) op de Witte Nete te Retie [R4-109]. Vanaf 2004 is de opstuwing door plantengroei zichtbaar.

Omwille van de plantengroei is het niet mogelijk om betrouwbare gemiddelde jaarlijkse debieten te geven van het station op de Witte Nete te Retie vanaf 2004. De debieten gemeten gedurende de wintermaanden kunnen wel nog als representatief worden beschouwd.

Voor de stations op de bevaarbare Kleine Nete te Grobbendonk en Herentals zijn er via het Hydrologisch Informatiecentrum [R4-110] wel volledige en gevalideerde debietmetingen beschikbaar voor het recente verleden. Op de zomerdebieten werd een plantengroei-correctie toegepast. De gemiddelde jaarlijkse debieten voor de periode 1983-2010 zijn in Figuur 4 - 67 weergegeven. Er is op het eerste zicht wel een relatie met het neerslagoverschot, maar dit verband is niet altijd even duidelijk.

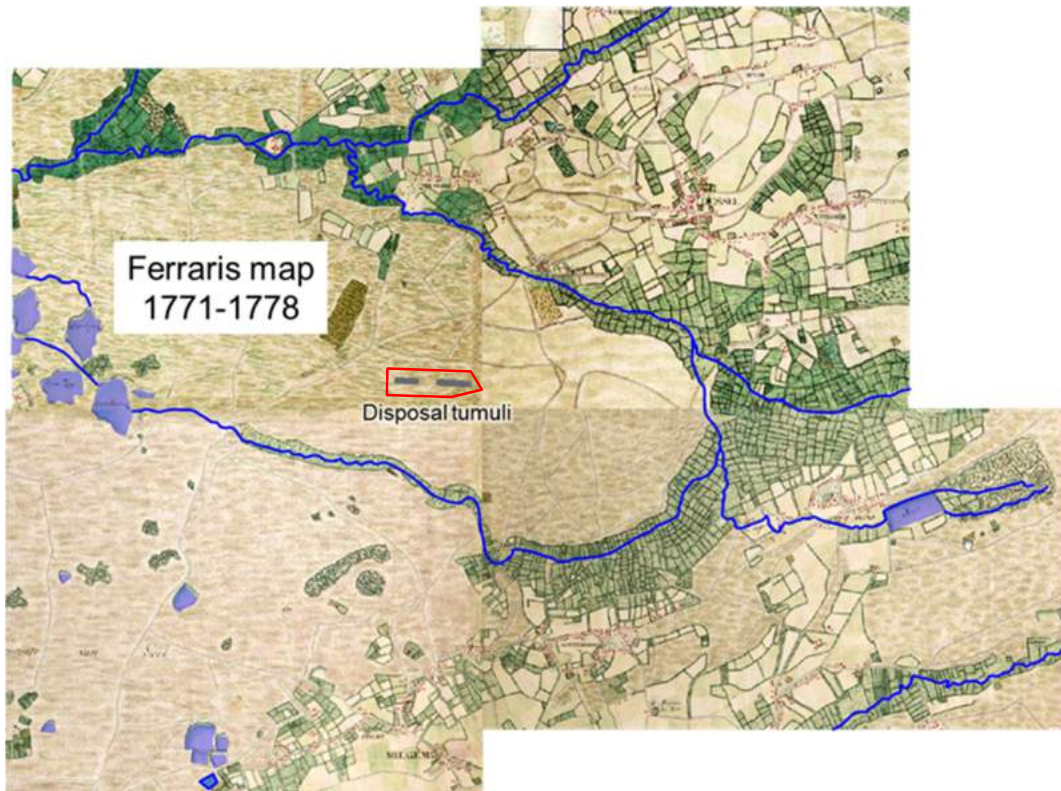


Figuur 4 - 67: Gemiddeld jaarlijks debiet (m³/s) op de Kleine Nete te Herentals en Grobbendonk in relatie tot het neerslagoverschot (P-ET<sub>0</sub>) (mm/a). P : neerslag (mm/a); ET<sub>0</sub> : potentiële evapotranspiratie (mm/a) [R4-110]. De metingen voor het station te Grobbendonk werden onderbroken van 1989-1992 en in 1997 en voor het station te Herentals van 2003 tot 2004. Hier beginnen de metingen pas in 1988.

#### 4.6.1.2.5 Evolutie van het lokale waterlopenstelsel op korte termijn ten gevolge van menselijke ingrepen

De geometrie van het huidige rivierennetwerk is het resultaat van menselijke activiteit. Oorspronkelijk meanderden de rivieren in de buurt van de site, waardoor de grondwater tafels in hun stroomgebieden hoger waren.

In de bekkenbeheerplannen en deelbekkenbeheerplannen [R4-111] wordt de beleidsvisie op het integraal waterbeleid ontwikkeld en beschreven. Het vormt de leidraad voor een vernieuwd waterbeleid, waarbij men tracht om zo dicht mogelijk terug bij het natuurlijke watersysteem aan te sluiten. Een belangrijke bron bij de reconstructie van de oorspronkelijke waterloop zijn de Ferraris kaarten (zie Figuur 4 - 68). De bekkenbeheerplannen vormen de aanzet voor werken op het terrein. Deze werken kunnen lokaal van invloed zijn op de afvoer, de waterstand in de rivieren en ook de grondwaterstand.



Figuur 4 - 68: Ferraris kaart in de omgeving van de bergingssite [R4-112].

Recent hebben de Provinciale Dienst Waterbeleid en de Provinciale Groendomeinen Regio Kempen in een gezamenlijk project werken aan de Breilooop uitgevoerd. Het ging hier om het wegwerken van vismigriatieknelpunten en de aanleg van paaiplaatsen en meanders.

Een toekomstig project volgens het deelbekkenbeheerplan van de provincie Antwerpen is het rivierherstel van de Witte Nete tussen de Boeretanghoeve en de weg Retie-Geel in de gemeente Dessel. De voorgestelde werken zijn de volgende:

- habitatverbeterende constructies in de waterloopbedding (stroomdeflectoren, stroomvernuauwers, lage dammetjes en zandbanken);
- oeverbeplanting die voor meer schaduw zorgt en minder planten in de waterloop;
- hermeandering van de waterloop.

Hieraan dient te worden toegevoegd dat de bergingssite zal worden voorzien van een infiltratiebekken. Meer detail hierover is opgenomen in §8.5.9.4 van HS08, en een algemene evaluatie van het effect van kleine oppervlaktewateren (zoals bv. het infiltratiebekken) op het stromingspatroon van het grondwater is opgenomen in §14.4.5.2.3.1 van HS14.

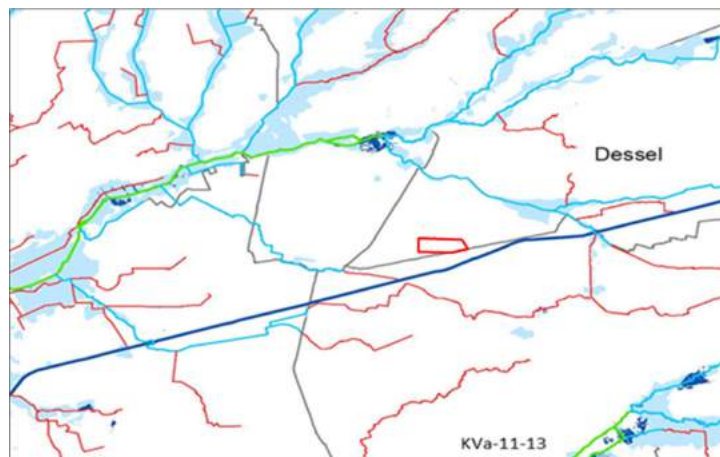
### 4.6.1.3 Overstromingen

#### 4.6.1.3.1 Kaart met effectief en mogelijk overstroombare gebieden

Figuur 4 - 69 geeft de kaart met de effectief en mogelijk overstromingsgevoelige gebieden weer voor de lokale schaal zoals geïdentificeerd in opdracht van de Vlaamse overheid [R4-222]. Dit zijn die gebieden die overstromingsgevoelig zijn gebaseerd op de van nature overstroombare gebieden, de potentiële overstromingsgebieden en de mijnverzakkingsgebieden.

De effectief overstromingsgevoelige gebieden zijn gebaseerd op de recent overstroomde gebieden (1988 tot 2005) en op de gemodelleerde overstromingsgebieden (met een terugkeerperiode van 100 jaar) langsheen de onbevaarbare en bevaarbare waterlopen (AWZ, VMM, sommige provinciebesturen).

Volgens deze kaart is de bergingssite te Dessel niet gelegen in effectief noch in mogelijk overstromingsgevoelig gebied.



Figuur 4 - 69: Overzicht van de lokaal effectief en mogelijk overstromingsgevoelige gebieden ([R4-222]).

#### 4.6.1.3.2 Recente overstromingen

Tabel 4 - 46 geeft de hoogst gemeten waterstanden van de limnograaf op de Kleine Nete te Retie aan [R4-110]. Tijdens de overstromingen van november 2010 werd het hoogste peil opgetekend sinds het begin van de metingen. Dit peil was nog eens 15 cm hoger dan het hoogste peil ooit gemeten. Er werden geen overstromingen waargenomen nabij de bergingssite.

**Tabel 4 - 46: Hoogst gemeten waterstanden (m TAW) aan de limnigraaf op de Kleine Nete te Retie sinds het begin van de waarnemingen.**

Datum	Waterstand (m TAW)
13/11/2010	20,16
28/07/2008	20,01
22/12/1982	19,99
19/11/2004	19,99
14/08/2006	19,94

#### **4.6.1.3.3 Modelling van het overstromingsrisico ter hoogte van de site voor berging van radioactief afval te Dessel**

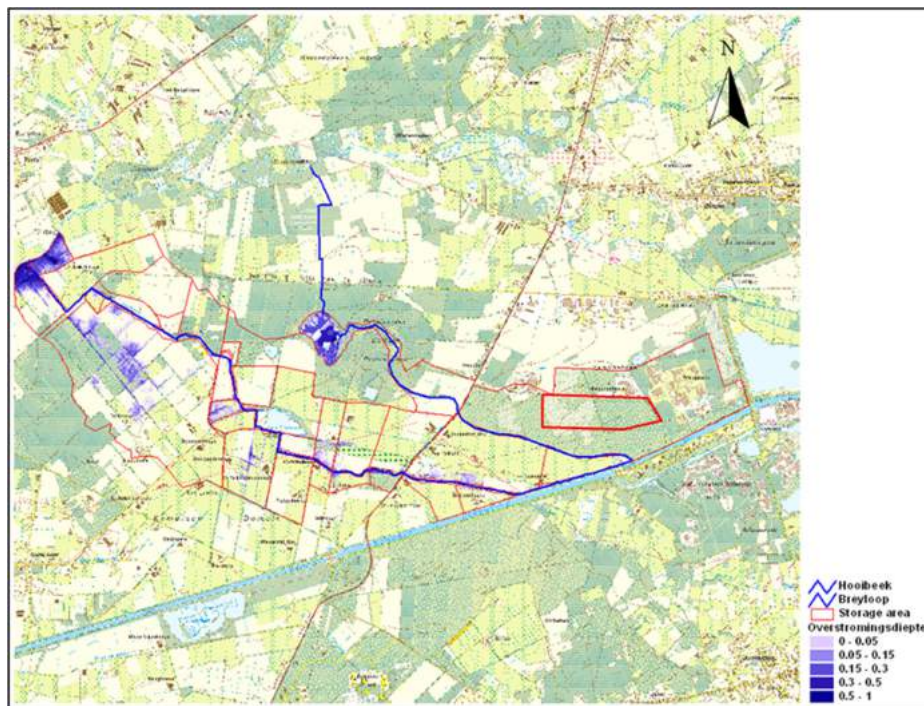
Om de overstromingskans ter hoogte van de bergingsite in te schatten, werd door IMDC een hydraulisch en hydrologisch oppervlaktewatermodel opgesteld (§2 in [OD-084]). In dit model zijn het stroomgebied van de Breilooop en de Hooibeek opgenomen. Overstromingen werden gesimuleerd bij het huidige klimaat en bij een extreem klimaatscenario (Figuur 4 - 70 en Figuur 4 - 71). Uit de modelstudie blijkt dat de overstromingsfrequentie ter hoogte van de site kleiner is dan  $10^{-7}$  per jaar.

Belangrijke onzekerheden van deze studie zijn onder andere:

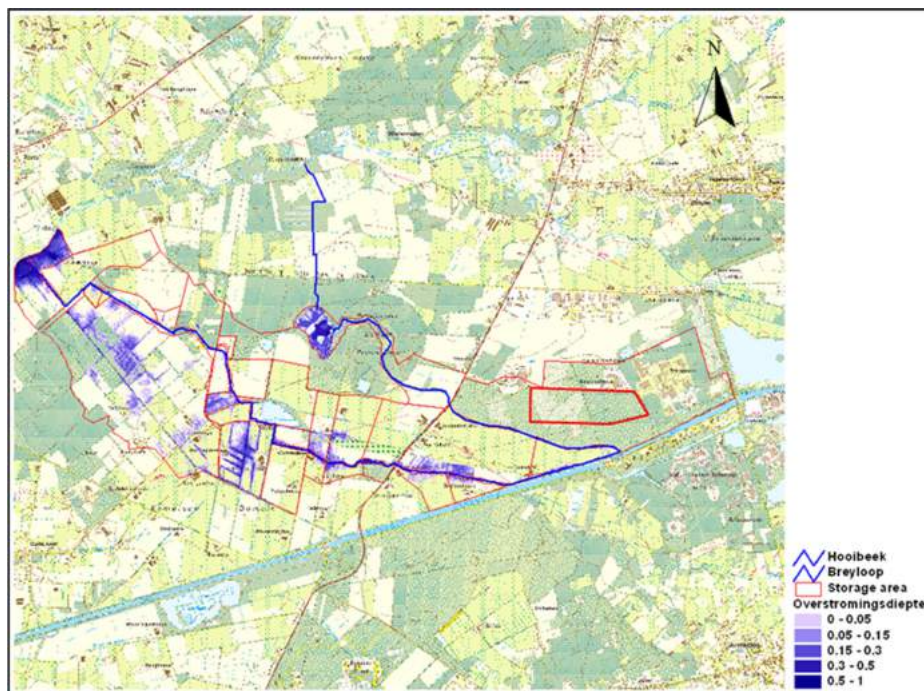
- Zowel het hydrologisch als hydraulisch model konden slechts beperkt gecalibreerd worden bij gebrek aan lange reeksen van debietgegevens. De parameters voor het hydrologisch model zijn overgenomen van het model van de Kleine Nete (VMM).
- De onzekerheid op klimaatscenario's is groot.

In Figuur 4 - 72 wordt het berekende waterstandsverloop weergegeven in functie van de tijd op basis van huidige hydrologische parameters en op basis van meer conservatieve parameters bij het afvoerhydrogram met het hoogste debiet. De toename van de maximale waterstand als gevolg van de conservatieve parameters is beperkt tot minder dan 5 cm. De gesimuleerde waterpeilen blijven onder 24,80 m TAW, wat aanzienlijk lager is dan het vloerpeil van de installatie dat 28 m TAW bedraagt.

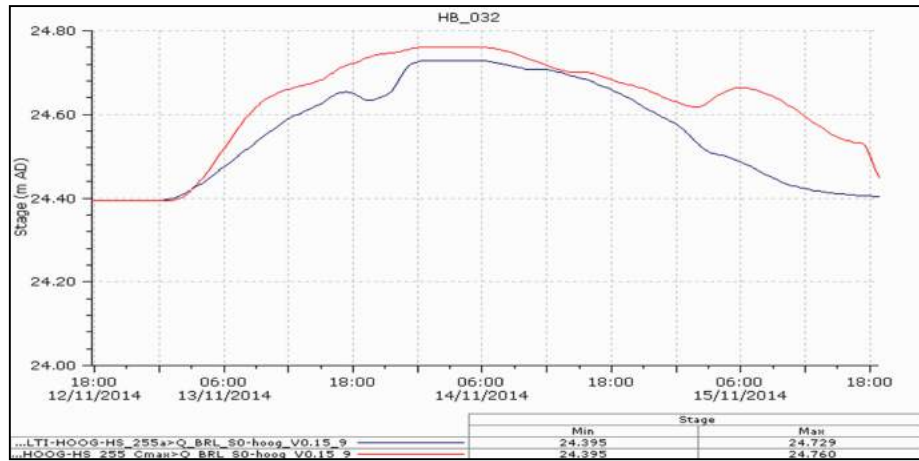
Als bijkomend scenario werd een simulatie uitgevoerd om de gevolgen van een mogelijke dijkdoorbraak van het kanaal Bocholt-Herentals opwaarts van sluis 6 te evalueren. Er werd uitgegaan van een initieel kanaalpeil van 25,5 m TAW, zijnde het huidige peil van het kanaal. De gesimuleerde dijkbreuk veroorzaakt slechts een beperkte overstroming op de rechteroever van de Hooibeek (Figuur 4 - 73). Het maximaal gesimuleerde waterpeil bij een dijkbreuk op deze oever is gelijk aan 25,2 mTAW, wat ruimschoots lager is dan het vloerpeil van de installaties.



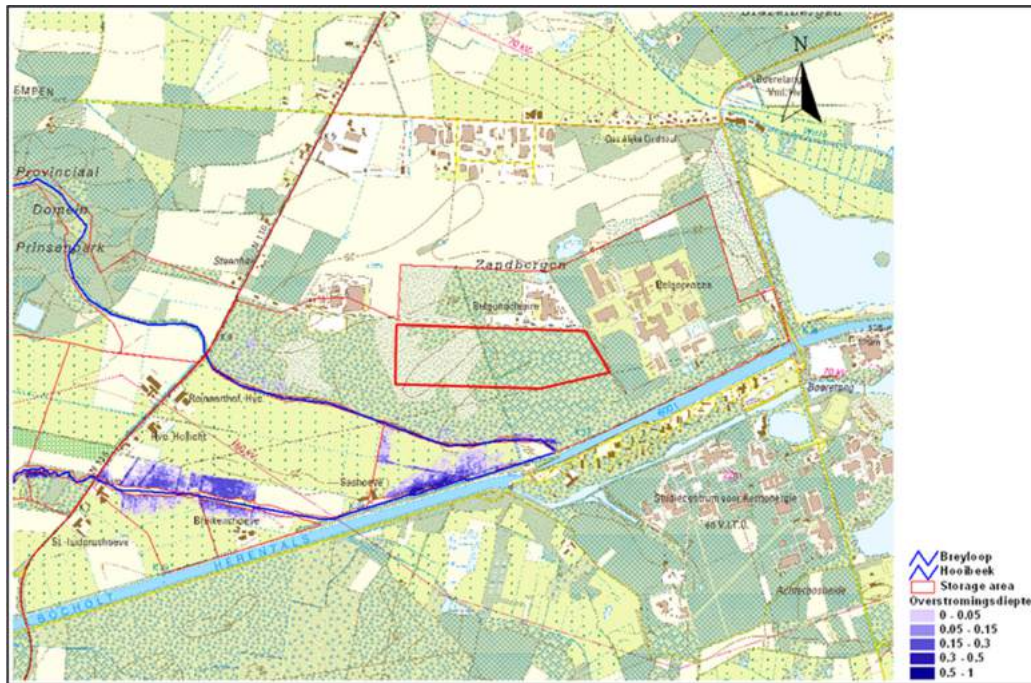
Figuur 4 - 70: Gesimuleerde overstromingen met een overschrijdingsfrequentie van  $10^{-7}$  per jaar voor het huidige klimaat (eenheden in meter).



Figuur 4 - 71: Gesimuleerde overstromingen met een overschrijdingsfrequentie van  $10^{-7}$  per jaar voor het hoog/nat klimaatscenario (zie §4.4.3.3, eenheden in meter).



Figuur 4 - 72: De gesimuleerde waterpeilen (in m TAW) voor knooppunt HB\_032 op de Hooibeek in functie van de tijd voor het afvoerhydrogram met het hoogste debiet met 'normale' hydrologische parameters (blauwe lijn) en met meer conservatieve parameters (rode lijn). Knooppunt HB\_032 situeert zich ter hoogte van de site.



Figuur 4 - 73: De gesimuleerde overstromingen bij een dijkbreuk van het kanaal Bocholt-Herentals (eenheden in meter).

## 4.6.2 Hydrogeologie

### 4.6.2.1 Infiltratie, evapotranspiratie en run-off

De infiltratie naar het grondwater en de actuele evapotranspiratie zijn parameters die niet rechtstreeks kunnen worden gemeten. Beide parameters, die afgetrokken moeten worden van de gemeten neerslag, werden geschat in de omgeving van Dessel door middel van neerslaggegevens en een numeriek model voor waterstroming in een onverzadigde bodem met een grasvegetatie en met typische bodemprofielen in de omgeving van de site (§8.2.1 in [OD-077]). Dit model is geïmplementeerd in HYDRUS 1D. De onzekerheid op de jaarlijkse gemiddelde neerslag (Tabel 4 - 22) is geschat op  $\pm 10$  mm/a (zie §4.4.2).

De meest voorkomende bodemtypes rond de site zijn van het type Zdg en X (zie ook Tabel 4 - 3). In de ruimere omgeving zijn dat bijkomend, bodems aangeduid als Zcg en Zeg<sup>34</sup> die representatief zijn voor respectievelijk droge en natte zandige bodems met een goed ontwikkelde Bh horizon (i.e. podzols, zie ook Figuur 4 - 16). De berekeningen werden verricht voor deze bodems (Zcg en Zeg), en de onderstelde hydraulische eigenschappen ervan zijn opgesomd in Tabel 4 - 47.

**Tabel 4 - 47: Hydraulische parameters (Van Genuchten - Mualem model) ondersteld voor de Zcg en Zeg bodems. Theta r: residueel watergehalte; Theta s: gesatureerd watergehalte; Alfa is gerelateerd aan de inverse van de 'air-entry suction';  $\eta$ : poriëngrootteverdeling; Ks: hydraulische geleidbaarheid; l: poriënconnectiviteit [OD-040].**

Zcg							
Materiaal	Dikte [cm]	Theta_r [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Theta_s [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Alfa [1/cm]	n [-]	Ks [cm/d]	l [-]
1	6	0,06	0,47	0,013	1,68	203	0,5
2	3	0,03	0,40	0,016	1,75	203	0,5
3	2	0,05	0,45	0,014	1,62	38,9	0,5
4	3	0,03	0,40	0,016	1,75	38,9	0,5
5	4	0,02	0,38	0,015	1,71	1120	0,5
6	82	0,02	0,38	0,016	1,75	1120	0,5

Zeg							
Materiaal	Dikte [cm]	Theta_r [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Theta_s [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ]	Alfa [1/cm]	n [-]	Ks [cm/d]	l [-]
1	10	0,06	0,46	0,013	1,63	402	0,5
2	6	0,02	0,38	0,017	1,86	402	0,5
3	6	0,03	0,41	0,015	1,68	52,7	0,5
4	22	0,03	0,4	0,016	1,73	52,7	0,5
5	56	0,02	0,39	0,015	1,71	142	0,5

<sup>34</sup> Z = zand, c = matig gedraineerd, e = slecht gedraineerd, g = bodems met een goed ontwikkelde ijzer of humus Bh horizon.



De bovenste randvoorwaarde voor de waterstroming in het bodemprofiel wordt berekend op basis van de volgende inputs: dagwaarden van de hoeveelheid water die de bodem onder de planten effectief bereikt (*throughfall*), de potentiële evaporatie vanuit de bodem, de potentiële transpiratie uit planten (§3.3 van [OD-040]). Die dagwaarden worden berekend uitgaande van plantkarakteristieken en dagwaarden voor de neerslag en de potentiële evapotranspiratie  $ET_0$ . De potentiële evapotranspiratie werd berekend uitgaande van de Penmann-Monteith vergelijking met volgende klimatologische parameters als input: zonnestraling, windsnelheid, relatieve vochtigheid en temperatuur (§2 van [OD-040]). In HYDRUS 1D wordt de opname van water door plantwortels berekend aan de hand van het Feddes model en de maximale worteldiepte (§3.2.3 van [OD-040]). De parameters voor de plantkarakteristieken voor grasvegetatie zijn in Tabel 4 - 48 weergegeven.

**Tabel 4 - 48: Parameters voor de plantkarakteristieken voor grasvegetatie**

Maximale worteldiepte [cm]	30																
Profiel van worteldichtheid [-]	Constant																
Parameters voor wortelopname (Feddes)	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Feddes' Parameters</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P0 [cm]</td> <td>-10</td> </tr> <tr> <td>P0pt [cm]</td> <td>-25</td> </tr> <tr> <td>P2H [cm]</td> <td>-300</td> </tr> <tr> <td>P2L [cm]</td> <td>-1000</td> </tr> <tr> <td>P3 [cm]</td> <td>8000</td> </tr> <tr> <td>r2H [cm/days]</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>r2L [cm/days]</td> <td>0.1</td> </tr> </tbody> </table>	Feddes' Parameters		P0 [cm]	-10	P0pt [cm]	-25	P2H [cm]	-300	P2L [cm]	-1000	P3 [cm]	8000	r2H [cm/days]	0.5	r2L [cm/days]	0.1
Feddes' Parameters																	
P0 [cm]	-10																
P0pt [cm]	-25																
P2H [cm]	-300																
P2L [cm]	-1000																
P3 [cm]	8000																
r2H [cm/days]	0.5																
r2L [cm/days]	0.1																
Bladoppervlakte-index LAI (leaf area index) [-]	2																
Crop factor ( $K_c$ ) [-]	1																
Interceptie capaciteit ( $w_c$ ) [mm]	0,55																
Interceptie factor ( $f_{int}$ ) [-]	0,1																

Op begroeide oppervlaktes rondom de bergingssite wordt er weinig oppervlakte run-off verwacht, door de aanwezigheid van hoog conductieve bodems en een relatief vlakke topografie. Oppervlakte run-off in deze omgeving wordt vooral verwacht op bebouwde oppervlaktes. Zo werd aangetoond dat ongeveer twee derde van de gesimuleerde run-off in het Netebekken wordt veroorzaakt door ondoorlatende gebieden of open water [R4-113].

Een constant grondwaterpeil op 1 m diepte werd aangenomen als onderste randvoorwaarde voor de gemodelleerde kolom. Dat is realistischer dan een vrije drainage als onderste randvoorwaarde, omdat de gemiddelde diepte van de grondwatertafel onder de site varieert tussen 1,56 m (april-september) en 1,38 m (oktober-maart) (zie Annex 2 uit [OD-077]).

De langjarige (1984 – 2009) gemiddelde infiltratie berekend met dit model, bedraagt 306 mm/a, ofwel 34% van de jaarlijkse neerslag (890 mm/a) (Tabel 4 - 49). De potentiële evapotranspiratie bedraagt 616 mm/a, terwijl de actuele evapotranspiratie 587 mm/a bedraagt (66% van de jaarlijkse neerslag)<sup>35</sup>. De berekende jaarlijkse

<sup>35</sup> De potentiële evapotranspiratie is de evapotranspiratie die er zou zijn indien er een onbeperkte watervoorraad ter beschikking zou zijn in het beschouwde gebied. Door veranderlijke factoren zoals vegetatie, bodemtype, maar vooral verzadigingsgraad van de bodem, zal de actuele evapotranspiratie door uitdroging van de bodem altijd kleiner of maximaal gelijk zijn aan de potentiële evapotranspiratie.

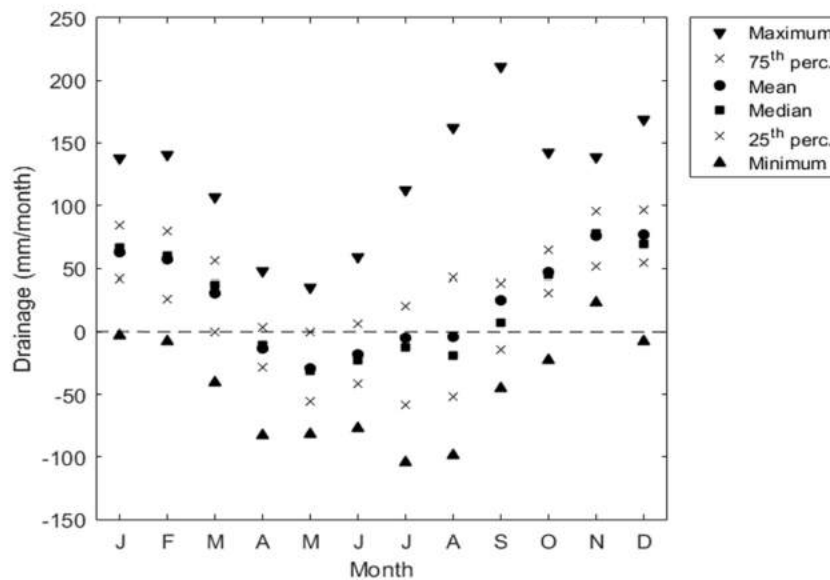
variabiliteit van de infiltratie is gegeven in Figuur 4 - 74. Negatieve waarden betekenen een opwaartse stroming van water, een situatie die tijdens de zomer voorkomt. Bemerkt dat de resultaten beïnvloed zijn door de aanname van een uniforme grasvegetatie. Men verwacht voor gemengd landgebruik een iets hogere infiltratie (+27%, zie [R4-38] en [R4-114]) en een lagere evapotranspiratie door de aanwezigheid van bebouwing [R4-113].

De schatting van de infiltratie bedraagt 306 mm/a ± 80 mm/a. De onzekerheid op deze waarde wordt veroorzaakt door onzekerheden op de plant-parameters en het bodemtype.

Tabel 4 - 49: Berekende infiltratie en evapotranspiratie te Dessel voor de periode 1984 – 2009.

(mm/a)	Neerslag (P)	Potentiële evapotranspiratie (ET <sub>0</sub> )	Through-fall	Actuele evapotranspiratie (ET <sub>a</sub> )	Infiltratie (I)
Gemiddelde	890 (100%)	616	808 (90,7%)	587 (65,9%)	306 (34,4%)
Mediaan	925 (100%)	613	829 (89,6%)	594 (64,2%)	328 (35,5%)

Hoewel de hier voorgestelde benadering geldige schattingen van grondwaterinfiltratie oplevert, is een verdere verfijning van het model mogelijk omdat het grondwater verondersteld wordt zich op een constante diepte van 1 m onder het bodemoppervlak te bevinden, en omdat het landgebruik en het bodemtype ook als constante ingevoerd zijn.



Figuur 4 - 74: Variabiliteit over een jaar van de drainage (grondwaterinfiltratie) te Dessel, berekend met HYDRUS 1D in de veronderstelling van afwezigheid van sneeuw en met een constant grondwaterpeil op 1 m diepte als onderste randvoorwaarde.

In een tweede stap worden de met HYDRUS 1D verkregen resultaten vergeleken met waarden uit de literatuur (Tabel 4 - 50). Hieruit blijkt dat ETa tussen 50% en 70% van de totale neerslag bedraagt, en I 30 tot 40%<sup>36</sup> van de totale neerslag. De infiltratie en onzekerheden geschat op basis van een numeriek model met HYDRUS 1D zijn in overeenstemming met de literatuurwaarden. Voor de evapotranspiratie daarentegen blijkt dat de literatuurwaarden een grotere spreiding vertonen, namelijk 50% tot 70 % van de totale neerslag, dan wat geschat werd met het HYDRUS 1D model. Dat heeft ook te maken met de verschillende zones en met het beschouwen van al dan niet gemengd landgebruik en bebouwde oppervlakte.

**Tabel 4 - 50: Componenten van de waterkringloop voor verschillende studies in NE-België. P = totale neerslag; ET = actuele evapotranspiratie; R = run-off; I = infiltratie naar grondwater.**

Bron	Zone	Periode	P (mm/a)	ET (mm/a)	R (mm/a)	I (mm/a)
Arol, 1990 <sup>1</sup> [R4-115]	Kleine Nete, Grobbendonk	1952-1986	805	394,5	161	249,5
Feyen et al., 1978 <sup>2</sup> [R4-116]	Gemeente Mol	1901-1970	796	414	143,3	238,8
Bladt et al., 1977 <sup>2</sup> [R4-117]	Grote Nete, Itegem	1967-1972	721	382,1	57,7	281,2
Cnudde, 1978 <sup>2</sup> [R4-118]	Mol	1956-1966	748	471,2	0	276,8
SCK, 2001 <sup>2</sup> [R4-119]	Kleine Nete, Grobbendonk	1980-1995	851	493,6	59,6	289,3
Baetsle et al., 1966 <sup>2</sup> [R4-120]	Mol	1961-1962	810	324	0	486
VITO, 2000 <sup>1</sup> [R4-121]	Mol	1981-1993	847			237,2
Verbeiren et al., 2006 <sup>2</sup> [R4-122]	Kempen	lange termijn				286
Batelaan and De Smedt, 2007 <sup>2</sup> [R4-113]	Netebekken	lange termijn	773	453	42	279,8

<sup>1</sup> waarden gebaseerd op een volledig hydrologisch model; <sup>2</sup> waarden gebaseerd op lokale waterbalans berekeningen

Op basis van de HYDRUS 1D berekeningen en de literatuurwaarden maken we voor de schatting van de evapotranspiratie een onderscheid tussen de directe omgeving van de site die weinig bebouwd is en de bredere omgeving van het Netebekken waarin effecten van bebouwing meegenomen worden.

Voor de schatting van de evapotranspiratie op niveau van het Netebekken gaan we uit van de verdeling van het landgebruik binnen het Netebekken. In [R4-123] is op analoge wijze als hierboven beschreven voor gras, de evapotranspiratie ook berekend voor gewassen, naaldbomen en loofbomen. Voor de schatting van de evapotranspiratie op de bebouwde oppervlakte onderstellen we 29 % van die oppervlakte als ondoorlatend (op basis van [R4-124]) en de overige 71 % als grasland. Rekening houdend met de fracties aan landgebruik voor gewassen, gras, naaldbomen, loofbomen en bebouwde oppervlakte wordt aldus bekomen dat de evapotranspiratie over het Netebekken ongeveer 55% van de neerslag bedraagt (Tabel 4 - 51). Voor een neerslag van 890 mm/a zoals beschouwd hierboven, wordt de evapotranspiratie voor het Netebekken geschat op 490 mm/a.

<sup>36</sup> De atypische waarden van de studie van Baetsle *et al.* (1966) werden niet in beschouwing genomen.

Samenvattend:

- Evapotranspiratie lokaal in de directe omgeving van de site (grasland):  $587 \pm 80$  mm/a
- Evapotranspiratie voor het Netebekken:  $490 \pm 80$  mm/a.

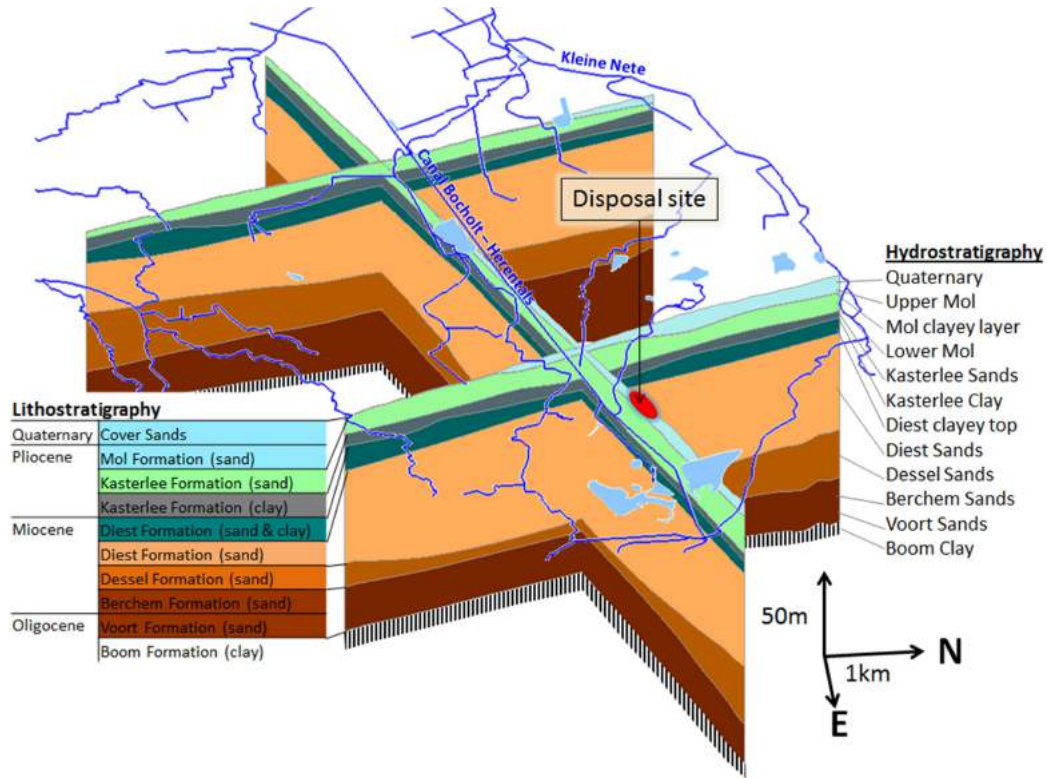
**Tabel 4 - 51: Schatting van de fracties evapotranspiratie ten opzichte van neerslag (P: totale neerslag; ET: actuele evapotranspiratie) op niveau van het Netebekken voor de verschillende wijzes van landgebruik.**

	fractie landgebruik in het Netebekken [-] ([R4-125])	Fractie ET/P [-] [R4-124]	fractie landgebruik $\times$ ET/P
Gewassen	0,37	0,45	0,17
Gras	0,22	0,66	0,15
Naaldbomen	0,12	0,73	0,09
Loofbomen	0,09	0,58	0,05
Bebouwde oppervlakte	0,16	$0,71 \times 0,66 = 0,47$	0,09
Fractie evapotranspiratie/neerslag gemiddeld over het Netebekken			0,55

#### 4.6.2.2 Identificatie, afbakening en beschrijving van de hydrostratigrafische eenheden

De hydrostratigrafische eenheden zijn gedefinieerd op basis van initiële informatie afkomstig van lithologische boorbeschrijvingen, geofysische open-boorgat metingen, interpretaties van CPT's (*cone penetration tests*), korrelgrootte-analyses, glauconietgehalte en CEC (*cation exchange capacity* - kationuitwisselingscapaciteit) van de sedimenten. De informatie die hier weergegeven wordt, is integraal afkomstig van het meest recente sitekarakterisatie rapport (§6.2 van [OD-051]).

De hydrostratigrafie is gebaseerd op het voorkomen van min of meer homogene eenheden, aquifers en aquitards, met relatief constante eigenschappen. Gedetailleerde analyses maken echter duidelijk dat de homogeniteit en laterale continuïteit vanaf de top van de Diest Zanden tot en met de Quartaire lagen minder evident is. Tijdens het afzetten van de Diest, Kasterlee en Mol Formaties evolueerde de regio van een min of meer open marien gebied naar een open baai, en nog later naar een estuarium en een riviervlakte. Dit reflecteert zich in een toenemende variatie tussen laterale sedimentpakketten van onder naar boven. Hiermee rekening houdend kan getracht worden een zo fijn mogelijk hydrostratigrafisch concept voorop te stellen. Dit heeft geleid tot een zeer lokale opdeling van de bovenste aquifer, met de identificatie van een dunne en ruimtelijk zeer beperkte kleirijkere laag in de Mol Zanden, en algemener van de Kasterlee Klei en de opsplitsing van de Diest Zanden in een bovenste kleirijkere pakket en een onderste zandig pakket (Tabel 4 - 52 en Figuur 4 - 75). Deze barrière (Kasterlee Klei en top Diest Formatie) bevindt zich echter op een diepte van een dertigtal meter, onder de Pliocene aquifer. Ze beschermt de onderliggende Miocene aquifer. Uit beide aquifers wordt grondwater gepompt.



Figuur 4 - 75: Semi-3D voorstelling van de hydrostratigrafie in de streek rond de site van Mol-Dessel.

De variabiliteit is het meest merkbaar in de meest ondiepe hydrostratigrafisch eenheid, namelijk de Quartaire afzettingen. Deze kunnen bestaan uit eolische zanden, grove fluviatiele zanden, maar ook lemige overstromingssedimenten. Variabiliteit is ook aanwezig binnenin de Mol Fm: zo wordt een onderscheid gemaakt tussen een Boven-Mol en een Onder-Mol. Dit onderscheid werd al aangehaald door [R4-126] begin jaren '60, waarbij “in de omgeving van Mol, een tiental meter grove zanden voorkomen bovenop een fijn zand met mica-houdende kleilenzen en vaag gespikkeld met glauconiet aan de basis”. Het onderscheid met de Zanden van Kasterlee is overigens moeilijk te maken. Hetzelfde geldt voor het onderscheid tussen de formaties van Kasterlee en Diest.

**Tabel 4 - 52: Algemene stratigrafie en hydrostratigrafie van de streek. Niet alle formaties zijn aanwezig in het volledige gebied (HCOV: Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen).**

Stratigrafie (deze studie)			Hydrostratigrafie	HCOV code
Formatie	Eenheid	Beschrijving		
Quartaire Fms.		Fijn tot middelmatig zand aangerijkt met OM, geel tot zwart/grijs; goed gesorteerd	Quartaire Zanden	100
Mol-Poederlee-Brasschaat		Groen tot bleek middelmatig zand met basisgrind; middelmatig tot goed gesorteerd		230
Mol	Boven	Wit tot bleekgrijs middelmatig tot grof kwartzand; middelmatig tot goed gesorteerd	Mol Zand	232
	Onder	Grijs middelmatig kwartzand; zeer goed gesorteerd	Mol Zand	232
Kasterlee	Kasterlee Zand	Grijs tot groenig fijn zand met wat glauconiet; goed gesorteerd	Kasterlee Zand	234
	Kasterlee Klei	Grijs tot groenig fijn zand met wat glauconiet, afgewisseld met kleilenzen middelmatig tot slecht gesorteerd	Kasterlee-Diest Transition Layer	242
Diest	Diest kleiige zone	Donkergroene tot bruine grove glauconiethoudend zand met diffuse klei; middelmatig gesorteerd	Diest Zand / KDTL	242 of 252
	Diest Zanden	Donkergroene tot bruine grove glauconiethoudend zand; middelmatig tot goed gesorteerd	Diest Zand	252
	Dessel	Donkergroen middelmatig tot fijn glauconiet en kalkrijk zand; zeer goed gesorteerd	Dessel Zand	252b
Berchem	Antwerpen	Donkergroen tot zwart fijn tot middelmatig glauconiethoudend zand; licht kleiig en rijk aan schelpen; middelmatig tot goed gesorteerd	Berchem Zand	254a
Voort		Fijn groen glauconiethoudend zand en groene zandige klei, rijk aan macrofossielen; middelmatig tot goed gesorteerd	Voort Zand	254b
Voort en/of Eigenbilzen		Donkergroen glauconiethoudend, kleirijk fijn zand met bioturbaties; middelmatig gesorteerd		256
Boom (Rupel Groep)	Boeretang	Alternatie van kleirijk silt en siltige klei met glauconiet, pyriet en carbonaat en OM; middelmatig gesorteerd		301

#### 4.6.2.3 Conceptueel hydrogeologisch model

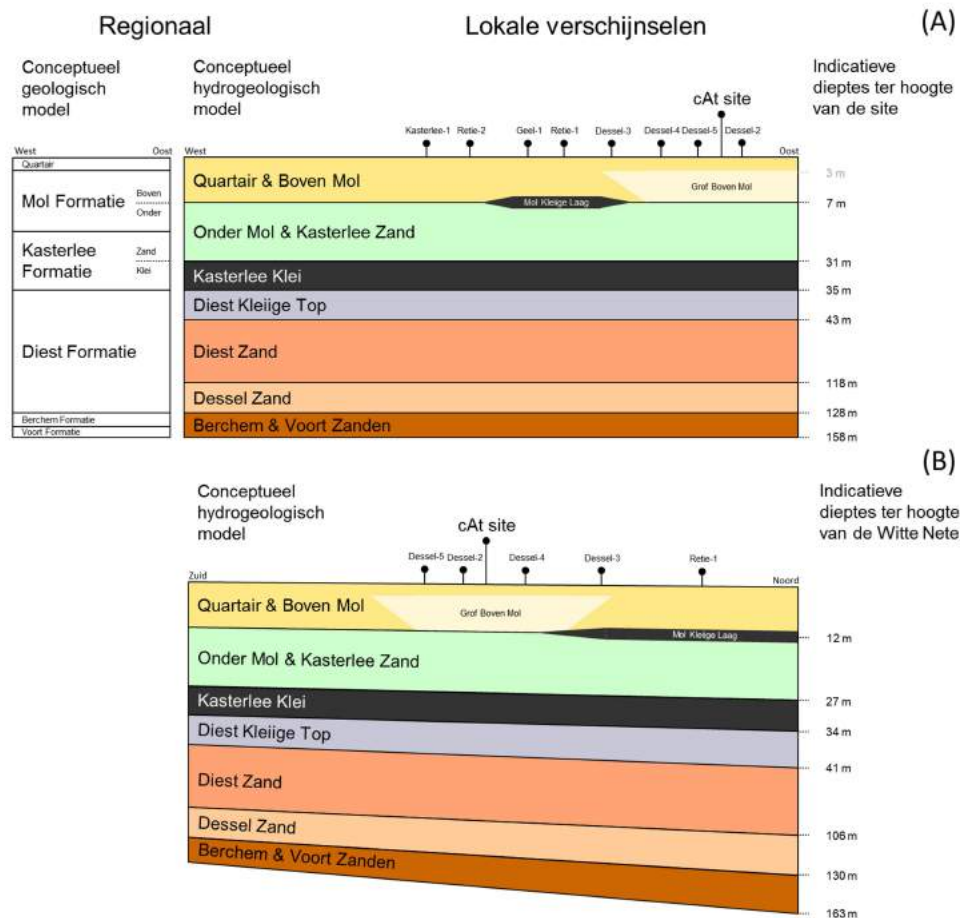
##### 4.6.2.3.1 Geologie

De Neogeen aquifer wordt in de regio Mol/Dessel in geologische termen onderverdeeld in het Quartair, en de Mol, Kasterlee, Diest, Berchem en Voort Formaties<sup>37</sup> (e.g. [R4-36]; §4.2 van [R4-219] en §6.2 van [OD-051]; Figuur 4 - 76).

Onder een ongeveer één tot anderhalve meter dikke bodem komen gelige tot geelbruine fijne zanden voor van variërende dikte die werden afgezet tijdens het Quartair. Deze zanden vertonen een overheersende korrelgroottefractie van 100-250 µm. In vergelijking met de Onder-Mol eenheid (zie verder in de tekst) zijn ze minder goed gesorteerd. De Mol Formatie wordt verder in de regio opgedeeld in een Boven-Mol en een Onder-Mol eenheid: de Boven-Mol zanden komen overeen met de goed gekende medium tot grove (belangrijke korrelgroottefractie van 250-500 µm) kwartzanden van de Mol Formatie. In de ON-Dessel-2, ON-Dessel-3 en ON-Dessel-4 boorkernen van de sitekarakterisatie uitgevoerd in 2002 en 2008 (Figuur 4 - 76) komen deze grove zanden net onder de Quartaire afzettingen voor (zie grof Boven-Mol in Figuur 4 - 76; §6.2 van [OD-051]). In de overige boringen meer naar het westen toe, bestaat de Boven-Mol eenheid eerder uit groenige medium zanden, die in principe ook tot de Poederlee of Brasschaat Formaties (laterale equivalenten van de Mol Formatie) zouden kunnen behoren. De Onder-Mol zanden daarentegen vertonen een belangrijke korrelgrootte fractie van 100-250

<sup>37</sup> de Voort Formatie behoort stratigrafisch gezien reeds tot het Paleogeen.

µm, zijn goed gesorteerd, zien er vaak grijsig uit en bevatten sporadisch zeer dunne kleilagen. Lokaal, in de ON-Dessel-3 en ON-Retie-1 boringen werd ter hoogte van de overgang tussen Boven-Mol en Onder-Mol een kleirijker facies teruggevonden (zie Mol Kleiige Laag in Figuur 4 - 76). De Kasterlee Formatie wordt eveneens opgedeeld, en dit in een zandig en een kleirijk gedeelte: het Kasterlee Zand lijkt zeer sterk op de Onder-Mol Zanden. Het onderscheid tussen de twee is vaak niet duidelijk, en de vastgelegde grens kan soms arbitrair zijn. De Kasterlee Klei daarentegen is duidelijk te onderscheiden door het grote aantal (tot 10 cm dikke) kleilagen, wat ook bijvoorbeeld een duidelijke signatuur geeft op geofysische logs en de CPT-metingen.



Figuur 4 - 76: Regionaal conceptueel geologisch en hydrogeologisch model, met een illustratie van lokale verschijnselen en indicatieve dieptes. (A) Oost-West doorsnede. (B) Noord-Zuid doorsnede (§2.1.2.1 van [OD-026]).

#### 4.6.2.3.2 Hydrogeologie

De lagen Quartair & Boven-Mol worden samen beschouwd als één eenheid binnen het conceptueel hydrogeologisch model, omwille van de beperkte dikte van het Quartair in de regio, de vaak ook beperkte hoeveelheid data voor de ondiepe sedimenten, en het feit dat hierdoor het onderscheid met de Boven-Mol eenheid niet voor de hand liggend is.

Door de sterke lithologische gelijkenissen tussen de Onder-Mol Zanden en het Kasterlee Zand, en de daarmee gepaard gaande, vaak arbitraire, moeilijk in kaart te brengen grens, bestaat er hydrogeologisch gezien geen reden om deze twee eenheden apart te beschouwen. In het hydrogeologisch conceptueel model worden ze dan ook samen beschouwd als ‘Onder-Mol & Kasterlee Zand’. Twee geologische eenheden met gelijkaardige hydrogeologische eigenschappen kunnen immers samen als één hydrogeologische eenheid worden beschouwd.

Omwille van zijn afsluitend karakter wordt de Kasterlee Klei als een aparte eenheid hernomen in het conceptueel hydrogeologisch model. Het gaat hier om het minst doorlatende deel van de kleirijke overgang tussen de Kasterlee en de Diest Formatie. Het overige deel, dat minder kleirijk is, bevindt zich reeds binnen de Diest Formatie, maar vertoont toch nog eigenschappen die sterk afwijken van deze van de typische Diest Zanden. Daarom wordt dit gedeelte van de kleirijke overgangslaag ook apart in het conceptueel hydrogeologisch model opgenomen als de ‘Diest Kleiige Top’.

Het gebruik van de Dessel Zand eenheid, een fijner Diest facies, in het conceptueel hydrogeologisch model is in feite historisch gegroeid ([R4-119], [R4-105], §2.1.2 in [OD-026]). De eigenschappen van deze eenheid wijken licht af van deze van het typische Diest Zand, bijvoorbeeld op basis van de ON-Dessel-5 pomptest, wat de aparte behandeling van deze eenheid in een hydrogeologische context rechtvaardigt. De invloed van deze laag op de processen in de ondiepe aquifer is echter zeer beperkt.

Tot slot blijven de Berchem en Voort Formaties over. Omwille van de beperkte invloed van deze diepe formaties op de hydrogeologische processen in de ondiepe Neogeen aquifer, werden beide eenheden samen beschouwd, als de Berchem & Voort Zanden, in het conceptueel hydrogeologisch model.

Zowel de geologische als hydrogeologische eenheden hellen af en nemen toe in dikte naar het noord-oosten. Dit wordt geïllustreerd door een oost-west als een noord-zuid doorsnede doorheen het conceptueel hydrogeologisch model, weergegeven in Figuur 4 - 76. Op deze laatste worden ook twee lokale fenomenen aangeduid, dewelke hieronder besproken worden, en die van belang zijn vermits duidelijke lokale hydrogeologische verschillen binnen eenzelfde geologische laag in rekening gebracht dienen te worden.

#### **4.6.2.4 Lokale fenomenen**

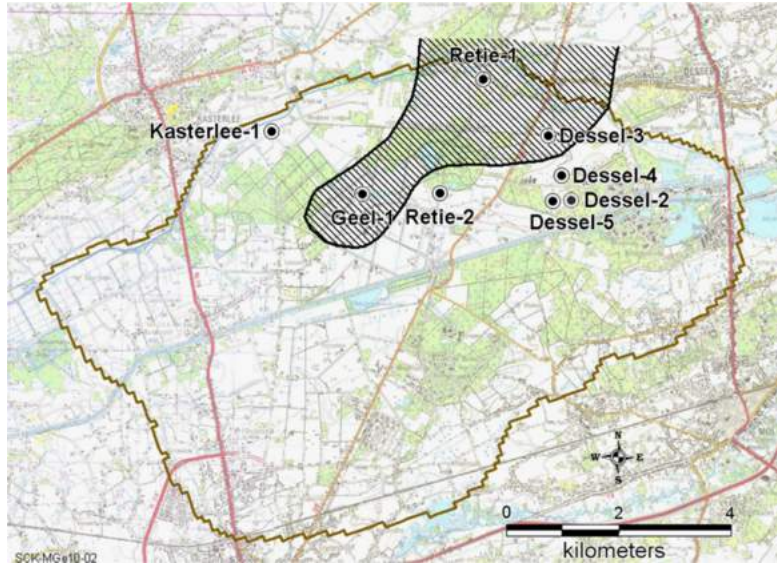
##### **4.6.2.4.1 De Mol Kleiige Laag**

In slechts enkele boringen, het meest uitgesproken in ON-Dessel-3 en ON-Retie-1, werden aan de basis van de Boven-Mol Zanden indicaties gevonden voor de aanwezigheid van een zeer dunne kleiige laag, hieronder de ‘Mol Kleiige Laag’ genoemd (§4.3.1.2 (Figuur 16) en §4.3.1.3 (Figuur 17) van [R4-219]). Het gaat hier om enkele zeer dunne kleilagen, binnen een zone van 30 cm tot 2 m dikte. Omwille van de mogelijke impact op de lokale grondwaterstroming werd deze lokale kleiige laag opgenomen in het conceptueel hydrogeologisch model. Het veronderstelde voorkomen van deze laag is in Figuur 4 - 77 weergegeven.

Voor het numeriek model werd deze laag in rekening gebracht door een 10 cm dikke lokale eenheid toe te voegen, met een lagere hydraulische geleidbaarheid. In §2.1.2.8 van [OD-026] wordt hierover gerapporteerd dat de ‘*composite scaled sensitivity*’ van de hydraulische geleidbaarheid van deze laag slechts 0,009 bedraagt, wat bijvoorbeeld een factor ~50 en een factor ~120 kleiner is dan deze voor de hydraulische geleidbaarheden van de eenheid Quartair & Boven-Mol enerzijds en de eenheid Onder-Mol & Kasterlee Zand anderzijds. Dit illustreert dus duidelijk het zeer beperkte belang van deze laag in het huidige numerieke model. Omwille van het feit dat de



laag niet voorkomt op de bergingssite, zal deze een beperkte impact hebben op de berekende potentiële radionuclideconcentraties.



Figuur 4 - 77: Lokale aanwezigheid van de kleiige laag tussen de Boven-Mol en de Onder-Mol Zanden, op basis van observaties in de Geel-1, Retie-1 en Dessel-3 boringen (§2.1.2.1 in [OD-026]). De bergingssite bevindt zich tussen Dessel-2 en Dessel-4.

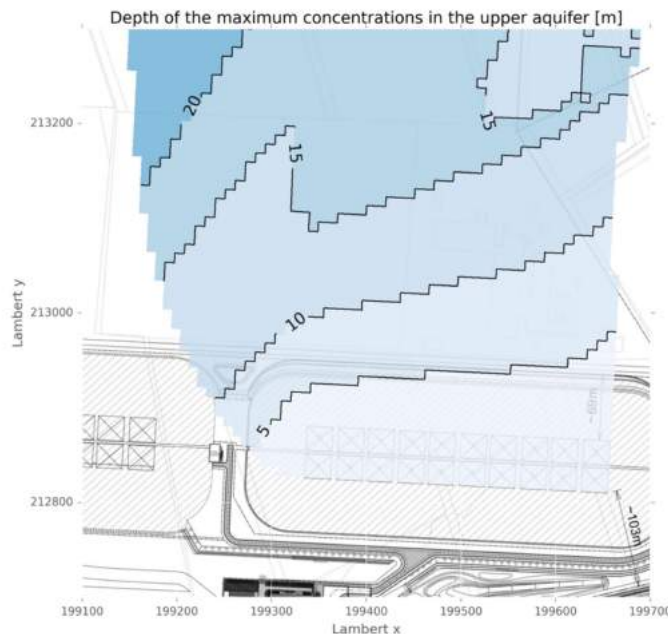
#### 4.6.2.4.2 Het Grof Boven-Mol facies

De goed gekende medium tot grove kwartzanden van de Boven-Mol eenheid, die in boringen ON-Dessel-2 (zie ook Figuur 4 - 43), ON-Dessel-3 en ON-Dessel-4 duidelijk terug te vinden zijn, lijken in het huidige studiegebied ook een lokaal fenomeen te zijn. Dit grof Boven-Mol facies binnen de Mol Formatie komt normaal ten oosten/noordoosten van het studiegebied ook voor, en is vermoedelijk het equivalent van het typische Maatheide Zand, wat consistent is met de noord-oostelijk afhellende lagen in de regio. De hydraulische eigenschappen van deze laag werden in 2002 en 2008 slechts in zeer beperkte mate gekarakteriseerd (§7.3 in [OD-051]), alhoewel er geen twijfel was dat het om grote doorlatendheden moest gaan, op basis van de korrelgrootteverdelingen (zie §4.6.2.6.2 “informatie verkregen uit de boorkernen”). In 2012 werden er echter ‘Direct Push’ metingen op de site gedaan (zie §4.6.2.6.2 “Direct Push testen”), waarbij het sterk afwijkende hydraulisch karakter van deze laag zeer duidelijk tot uiting kwam. De laag werd dus na het ontwikkelen van het model pas degelijk gekarakteriseerd, en wordt daarom momenteel niet met aparte parameters behandeld in het model. Het sterk afwijkende hydraulische karakter maakt dat de laag apart zou moeten opgenomen worden in het conceptueel, alsook in het numeriek hydrogeologisch model (zie [R4-127] en aanbevelingen [R4-128]). Deze analyse is voorzien en indien er een impact zou zijn op de geotransferfactor, dient dit opgevangen te worden door de bronterm (definitie van de geotransferfactor of afgekort GTF in §14.4.5 van [HS14]). De impact op de geotransferfactor is waarschijnlijk zeer gering (zie ook §4.6.2.6.4 “Conclusies” en §4.6.2.7.4 “Impact op potentiële radionuclideconcentraties”) vermits hogere hydraulische geleidbaarheden (K) zullen resulteren in kleinere gradiënten waardoor de stroomsnelheden weinig zullen veranderen.

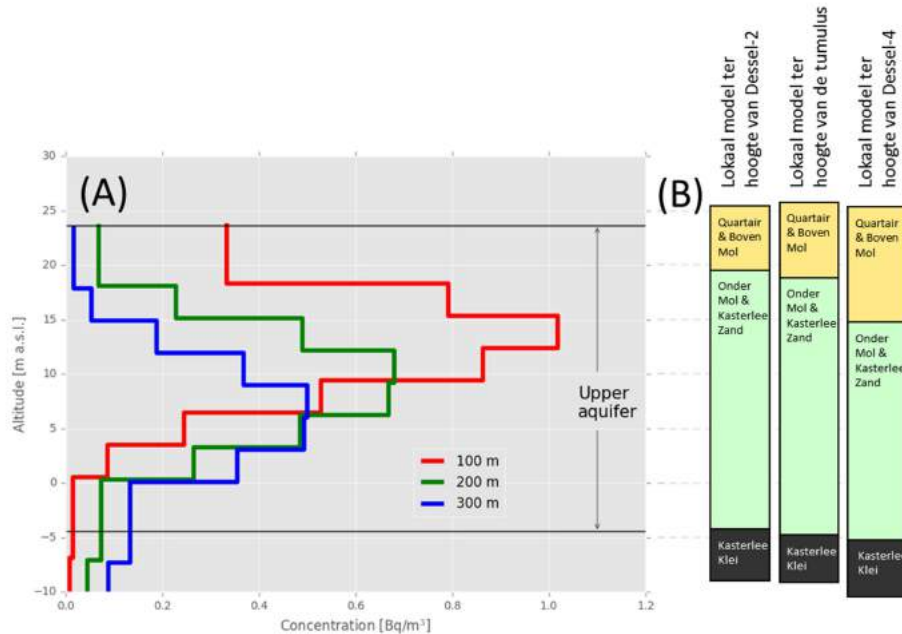
#### 4.6.2.5 Karakterisatie van de migratiewegen tussen de modules en de veronderstelde waterput

Omdat we hier focussen op de impact van onzekerheden van de hydraulische geleidbaarheid op potentiële radionuclideconcentraties in de veronderstelde waterput op 70 meter afstand van de bergingsmodules, kunnen we ons verder beperken tot de hydrogeologische eenheden die mogelijks beïnvloed zullen worden door de migratie van radionucliden. Dit is in kaart gebracht in Figuur 4 - 78 en Figuur 4 - 79, waar de geografische en verticale locatie van de gesimuleerde contaminatiepluim onder het referentiescenario wordt getoond (zie ook [HS14; §14.4.5.5]; [OD-026]).

Figuur 4 - 78 geeft de diepte onder het maaiveld van de maximum gesimuleerde concentraties in de bovenste aquifer (i.e. boven de Kasterlee Klei). Hieruit blijkt duidelijk dat op 70 meter afstand van de bergingsmodules, de afstand die beschouwd wordt voor de veronderstelde waterput (en dus voor het bepalen van de geotransferfactor), het maximum van de contaminatiepluim slechts een diepte bereikt van 5 tot 10 meter. Dit toont duidelijk aan dat slechts het ondiepe gedeelte van de aquifer dient te worden beschouwd. Figuur 4 - 79 geeft verder drie verticale profielen van gesimuleerde concentraties, voor een afstand van 100, 200 en 300 meter van de bergingsinstallatie. Hieruit blijkt dat het grootste gedeelte van de pluim zich in de eerste 15 meter situeert (zie berekening 100 m); voor een afstand van 70 meter zal de contaminatiepluim nog ondieper gelegen zijn. Dit betekent dat vooral de Boven- en Onder-Mol eenheden een rol spelen bij de berekening van de GTF (Figuur 4 - 79B). Daarom zal de bespreking van de hydraulische eigenschappen en de grondwaterstroming zich in hoofdzaak beperken tot de bovenste aquifer, bestaande uit het Quartair, Boven- en Onder-Mol, en het Kasterlee Zand.



Figuur 4 - 78: Diepte van de maximum concentraties uit het "radiological impact and safety assessment model – detailed scale" in [OD-026]. De resultaten zijn enkel weergegeven voor het gedeelte van de contaminatiepluim met waarden boven 0,01 Bq/m<sup>3</sup> en voor de oostelijke tumulus. Een afstand van 70 m komt ongeveer overeen met de ligging van de Europalaan.



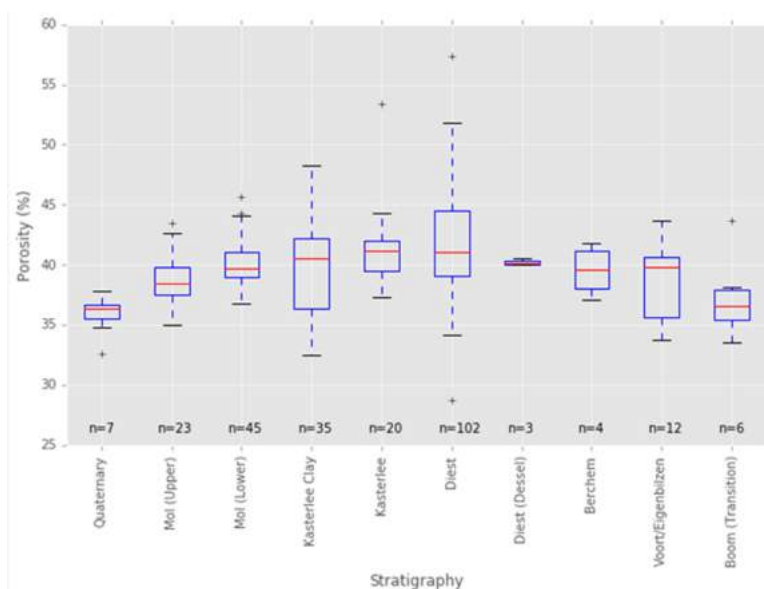
**Figuur 4 - 79: Overzicht van de verticale locatie van de contaminatiepluim, zoals gesimuleerd door [OD-026], relatief ten opzichte van de lagen uit het conceptuele hydrogeologische model. (A) Verticale locatie van de contaminatiepluim op verschillende afstanden van de bergingsinstallatie. (B) Stratigrafische kolommen uit het numeriek model.**

#### 4.6.2.6 Hydraulische eigenschappen van de hydrostratigrafische eenheden

##### 4.6.2.6.1 Watergehalte, totale porositeit en effectieve porositeit

De totale porositeit varieert voor alle onderzochte eenheden tussen 36-46% (Figuur 4 - 80 (interkwartielafstand) en Tabel 4 - 53). De Kasterlee Klei wordt gekenmerkt door iets lagere porositeitswaarden, ongeveer 30% voor de kleirijke stalen. De meer zandrijke stalen van deze laag halen echter porositeitswaarden tot 40% en meer. De onderliggende Diest Fm wordt gekenmerkt door porositeitswaarden van ongeveer 40%. Deze waarde is relatief constant in een aantal boringen, bijvoorbeeld voor ON-Geel-1 en ON-Kasterlee-1, maar lokale verschillen bestaan in andere boringen, zoals voor ON-Retie-1 en ON-Retie-2 met extreme porositeitswaarden van 32% en 46%. De porositeit is ook relatief constant voor de Kasterlee Fm, meestal rond 40%. Ten slotte lijkt de porositeit van de Mol Fm niet wezenlijk te verschillen van die van Kasterlee. Merk echter op dat een lichte daling van de porositeit van slechts een paar procent kan worden waargenomen op de overgang tussen de Formaties van Kasterlee en Mol. Dit is te wijten aan het feit dat deze laatste zanden iets minder goed gesorteerd<sup>38</sup> zijn in vergelijking met de eerste.

<sup>38</sup> De sortering geeft de verdeling van de korrelgroottes van een sediment weer. Slecht gesorteerd geeft aan dat de korrelgroottes van het sediment gemengd zijn (grote variantie), goed gesorteerd geeft aan dat de korrelgroottes van het sediment gelijkaardig zijn (kleine variantie).



Figuur 4 - 80: Overzicht van de totale porositeit van de verschillende onderzochte formaties door middel van boxplots. Rode lijn is de mediaan, de stippellijn gaat tot het verste punt binnen 1,5 maal de interkwartielafstand van het 1<sup>o</sup> of 3<sup>o</sup> kwartiel, kruisjes zijn de uitschieters.

Tabel 4 - 53: Porositeitsgegevens gecombineerd voor alle boringen (tabel 23 in [OD-051])

Stratigrafie	Aantal waarnemingen	Minimum (vol.%)	Maximum (vol. %)	Gemiddelde (vol. %)	SD	Variatiecoëfficiënt
Quartair	7	32,60	37,80	35,90	1,70	4,7%
Boven-Mol	23	35,00	43,50	38,83	2,19	5,6%
Onder-Mol	45	36,80	45,70	40,24	1,84	4,6%
Kasterlee	20	37,30	53,40	41,45	3,29	7,9%
Kasterlee Klei	35	32,50	48,30	39,68	3,89	9,8%
Diest	102	28,70	57,40	42,03	4,45	10,6%
Diest (Dessel)	3	40,00	40,50	40,20	0,26	0,7%
Berchem	4	37,10	41,80	39,53	2,19	5,6%
Voort/Eigenbilzen	12	33,74	43,65	38,59	3,29	8,5%
Boom (Overgang)	6	33,49	43,66	37,28	3,51	9,4%

De effectieve porositeit van een aantal lagen is gekend uit gefitte transportparameters [R4-221]. Ter hoogte van de site (ON-Dessel-2) wijken deze voor de onderzochte eenheden (Kasterlee, Kasterlee Klei en Diest kleiige zone) af van de totale porositeit (Tabel 4 - 54). Vooral voor de Kasterlee Klei is het verschil zeer groot, met een effectieve porositeit die slechts 55% bedraagt van de totale porositeit.

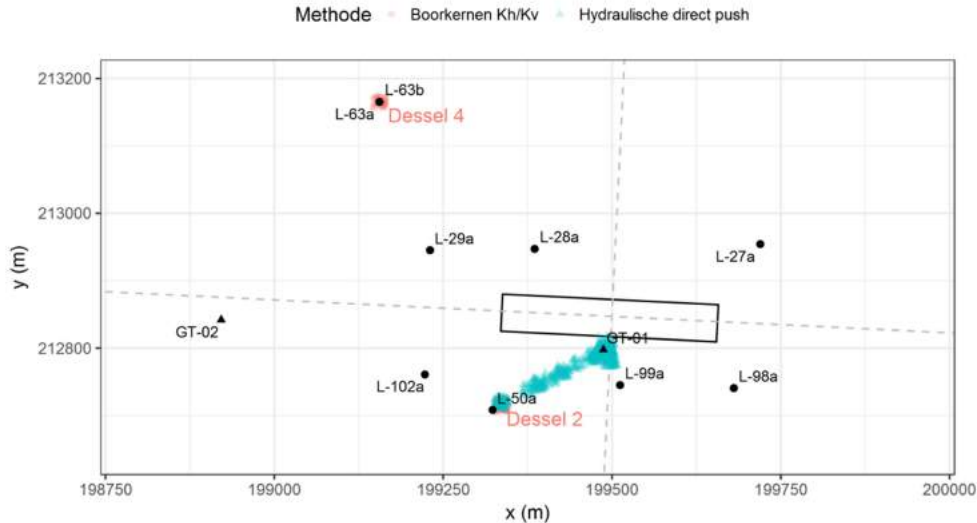
Tabel 4 - 54: Gemiddelde, standaardafwijking en variatiecoëfficiënt van de effectieve porositeit per stratigrafische laag (n.b. = niet berekend wegens te weinig gegevens). De data zijn afkomstig uit [R4-221] en aangepast aan de nieuwe stratigrafie zoals hierboven beschreven

Stratigrafie	Aantal observaties	Gemiddelde (vol. %)	Standaardafwijking	Variatie-coëfficiënt (%)
Kasterlee (zand)	2	26	n.b.	n.b.
Kasterlee Klei	4	22	8	38
Diest kleiige zone	2	33	n.b.	n.b.

#### 4.6.2.6.2 Hydraulische geleidbaarheid

##### Locatie en aard van de meetpunten

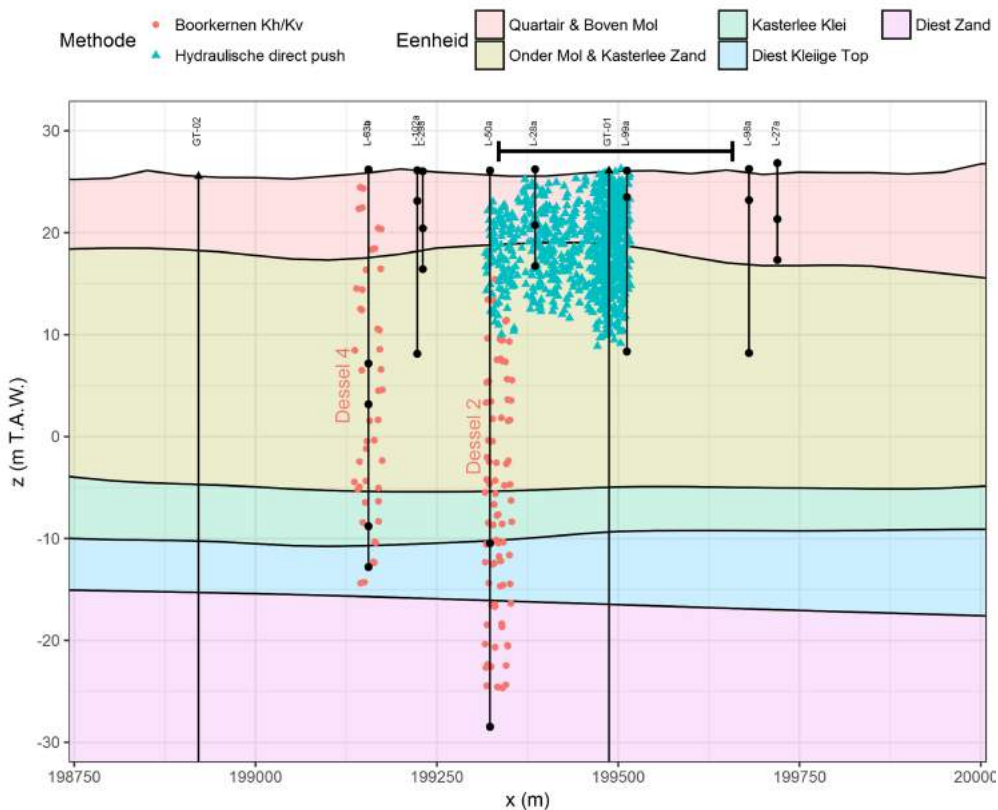
Figuur 4 - 81 geeft een overzicht van de locaties waar relevante informatie verkregen werd met betrekking tot de hydraulische geleidbaarheid in de bovenste aquifer, ter hoogte van de bergingsite en zijn directe omgeving. Het gaat hier om de ON-Dessel-2 en ON-Dessel-4 boringen, waarvan de resultaten van verschillende testen op de boorkernen en de pomptesten beschikbaar zijn. Verder zijn er ook de twee geotechnische boringen (GT-01 en GT-02), waar geen labo-metingen voor het bepalen van de hydraulische geleidbaarheid voor gebeurden, maar wel korrelgroottes over de hele diepte werden geanalyseerd. Vervolgens zijn er nog de *Direct Push* testen, en de peilbuizen die geplaatst werden voor de uitvoering van diluïettesten.



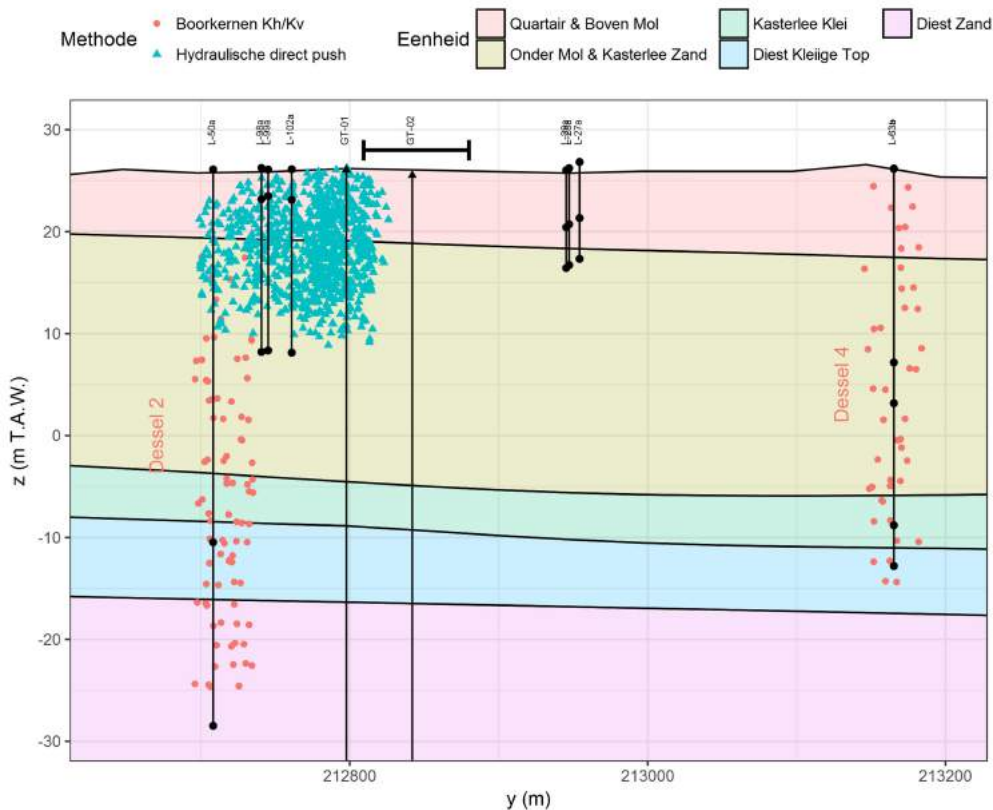
Figuur 4 - 81: Overzicht van de locaties met relevante informatie met betrekking tot de hydraulische geleidbaarheid in de bovenste aquifer, ter hoogte van de bergingsite en zijn directe omgeving. In het rood de twee gekernde boringen, de blauwe driehoeken zijn de 'Direct Push' testen, de zwarte driehoeken de geotechnische boringen (GT), en de zwarte bolletjes de peilbuizen (L). De grijze stippellijnen tonen de locatie van de profielen weergegeven in Figuur 4 - 82 en Figuur 4 - 83.

In Figuur 4 - 82 en Figuur 4 - 83 worden dezelfde locaties en metingen getoond, geprojecteerd via hun x of y coördinaat, op een verticale doorsnede doorheen de geometrie van de hydrogeologische lagen, zoals gekarteerd in de terreincampagne van 2008 (exact dezelfde geometrie wordt gebruikt in het numeriek model).

Eerst worden de verschillende bronnen die informatie verschaffen over de hydraulische geleidbaarheid, behandeld. Een vergelijking van de verschillende resultaten volgt, en het meest relevante bereik van hydraulische geleidbaarheden wordt vastgelegd in het kader van de voornaamste migratiewegen, en op basis van metingen.



Figuur 4 - 82: Oost-west profiel met de verschillende locaties, peilbuizen en boringen relevant voor het bepalen van de hydraulische geleidbaarheid, op het profiel geprojecteerd met behulp van hun x coördinaat. De locatie van het profiel is aangeduid op Figuur 4 - 82. De geometrie van de hydrogeologische eenheden is deze van de terreincampagne in 2008 en komt overeen met de geometrie in het numeriek model. De locatie van de oostelijke tumulus is aangeduid met een horizontale lijn boven het maaiveld. De filters van de verschillende peilbuizen zijn aangeduid door middel van bolletjes (tweede (bovenkant) en derde (onderkant), eventueel ook het vierde en vijfde). Enkel de locaties van de labo-metingen op de boorkernen en de 'Direct Push' data werden ter illustratie aan de figuur toegevoegd (met een willekeurige spreiding op de x coördinaat voor betere visualisatie).



Figuur 4 - 83: Noord-zuid profiel met de verschillende locaties, peilbuizen en boringen relevant voor het bepalen van de hydraulische geleidbaarheid, op het profiel geprojecteerd met behulp van hun y coördinaat. De locatie van het profiel is aangeduid in Figuur 4 - 82. De geometrie van de hydrogeologische eenheden is deze van de terreincampagne in 2008 en komt overeen met de geometrie in het numeriek model. De locatie van de oostelijke tumulus is aangeduid met een horizontale lijn boven het maaiveld. De filters van de verschillende peilbuizen zijn aangeduid door middel van bolletjes (tweede (bovenkant) en derde (onderkant), eventueel ook het vierde en vijfde). Enkel de locaties van de labo-metingen op de boorkernen en de 'Direct Push' data werden ter illustratie aan de figuur toegevoegd (met een willekeurige spreiding op de y coördinaat voor betere visualisatie).

### Informatie verkregen uit de boorkernen

#### 1. Labo-metingen op stalen

In de directe omgeving van de bergingsite bevinden zich twee gekernde boringen, ON-Dessel-2 en ON-Dessel-4, waarvan de eerste in feite meer representatief is voor de bergingsite. De ON-Dessel-4 boring bevindt zich noordwaarts van de tumulus buiten de gesimuleerde contaminatiepluim. De labo-metingen van de hydraulische geleidbaarheid, uitgevoerd op kleine stalen van de boorkernen worden uitvoerig besproken in §7.3.1 van [OD-051]. De doorsnedes in Figuur 4 - 82 en Figuur 4 - 83 tonen de locaties van deze stalen. In boring ON-Dessel-2

start de monstername pas in de Onder-Mol & Kasterlee Zand eenheid<sup>39</sup>. De resultaten van deze metingen laten dus hier niet toe om de hydraulische geleidbaarheid van de grove Boven-Mol Zanden in te schatten. In de ON-Dessel-4 boring werden er wel enkele stalen genomen van deze grove zanden, die er een 3-tal meter dieper blijken voor te komen, maar uit de korrelgrootte-analyses blijkt dat ze daar iets minder grof zijn dan in ON-Dessel-2 (en ook dan in ON-Dessel-3 bijvoorbeeld). De stalen van ON-Dessel-4 laten dus wel toe om een schatting te maken van de hydraulische geleidbaarheid van deze grove zanden. In beide boringen zijn er wel voldoende data in de Onder-Mol & Kasterlee Zand eenheid om hiervoor de hydraulische geleidbaarheid in te schatten. De meetwaarden zijn weergegeven in Figuur 4 - 84 en Figuur 4 - 85 voor ON-Dessel-2 en ON-Dessel-4 respectievelijk.

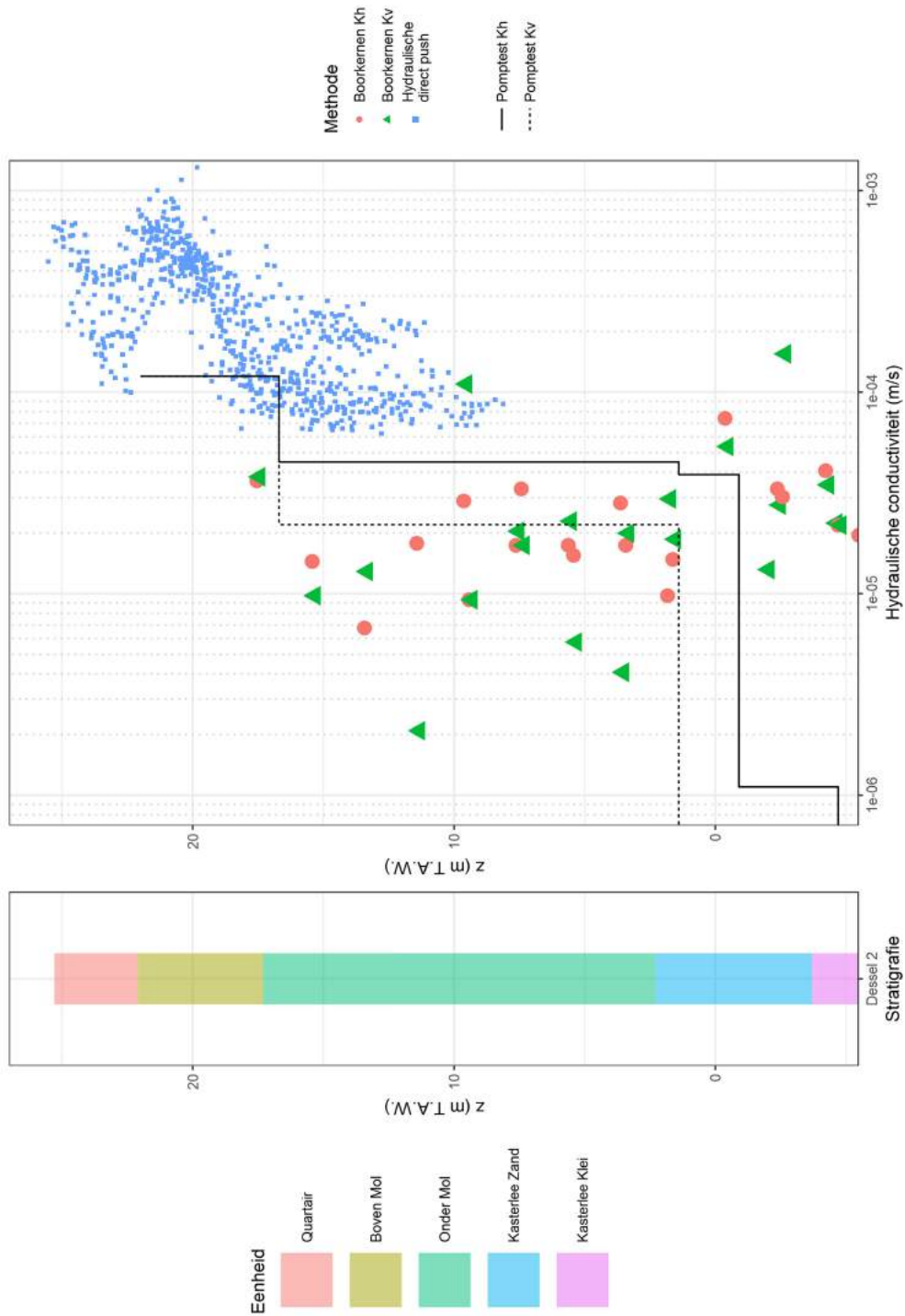
Omwille van de kleine stalen (meestal 100 cm<sup>3</sup>), en de kleinschalige variabiliteit van de sedimenten in de aquifer, zit er een redelijk grote spreiding op deze resultaten, die niet representatief is voor de onzekerheid van de hydraulische geleidbaarheid op de schaal relevant voor het bepalen van de geotransferfactor. Wel wordt verwacht dat hydraulische geleidbaarheden representatief voor een grotere ruimtelijke schaal binnen het bereik van deze waarden vallen, indien de stalen volledig onverstoorde zouden zijn. Bij het steken van de boorkernen treedt er immers compactie op, waarna de sedimenten in verticale richting weer decompacteren. Bij het steken van de staalhouders voor de analyse van de hydraulische geleidbaarheid, treedt dan opnieuw compactie/decompactie op. De data geven dus zeker een goed idee over de kleinschalige variabiliteit, maar de absolute waarden zijn niet zeer betrouwbaar. Een systematische afwijking is met andere woorden waarschijnlijk. Als er een systematische compactie gebeurt is van de stalen, zal er steeds een systematische afwijking zijn.

Statistische testen op de hydraulische geleidbaarheden gemeten op de kernen van de verkenningscampagne in 2008 toonden ook aan dat er op basis van deze metingen in de meeste boringen geen significante verschillen zijn tussen de gemiddelde waarden voor de Boven-Mol, Onder-Mol en Kasterlee Zand eenheden (§7.3.1.2 in [OD-051]). Die gekernde boringen zijn ten noorden en ten westen gesitueerd van de bergingssite, binnen het gebied van het Lokale hydrogeologische model (zie Figuur 4 - 77). De afwezigheid van significante verschillen gaf aanleiding tot de samenvoeging van de Onder-Mol en Kasterlee Zand eenheid in het huidige Lokale hydrogeologische model. Als men focust op de nabije omgeving van de bergingssite zelf, zoals blijkt uit de statistische analyse van de ON-Dessel-4 boring, is er wel een verschil tussen Quartair/Boven-Mol en Onder-Mol/Kasterlee Zand (Figuur 4 - 85). Tegen de tweede Wetenschappelijke Raad zal een aangepast hydrogeologisch model worden opgesteld dat rekening houdt met de lokale effecten op de site en in de nabije omgeving ervan.

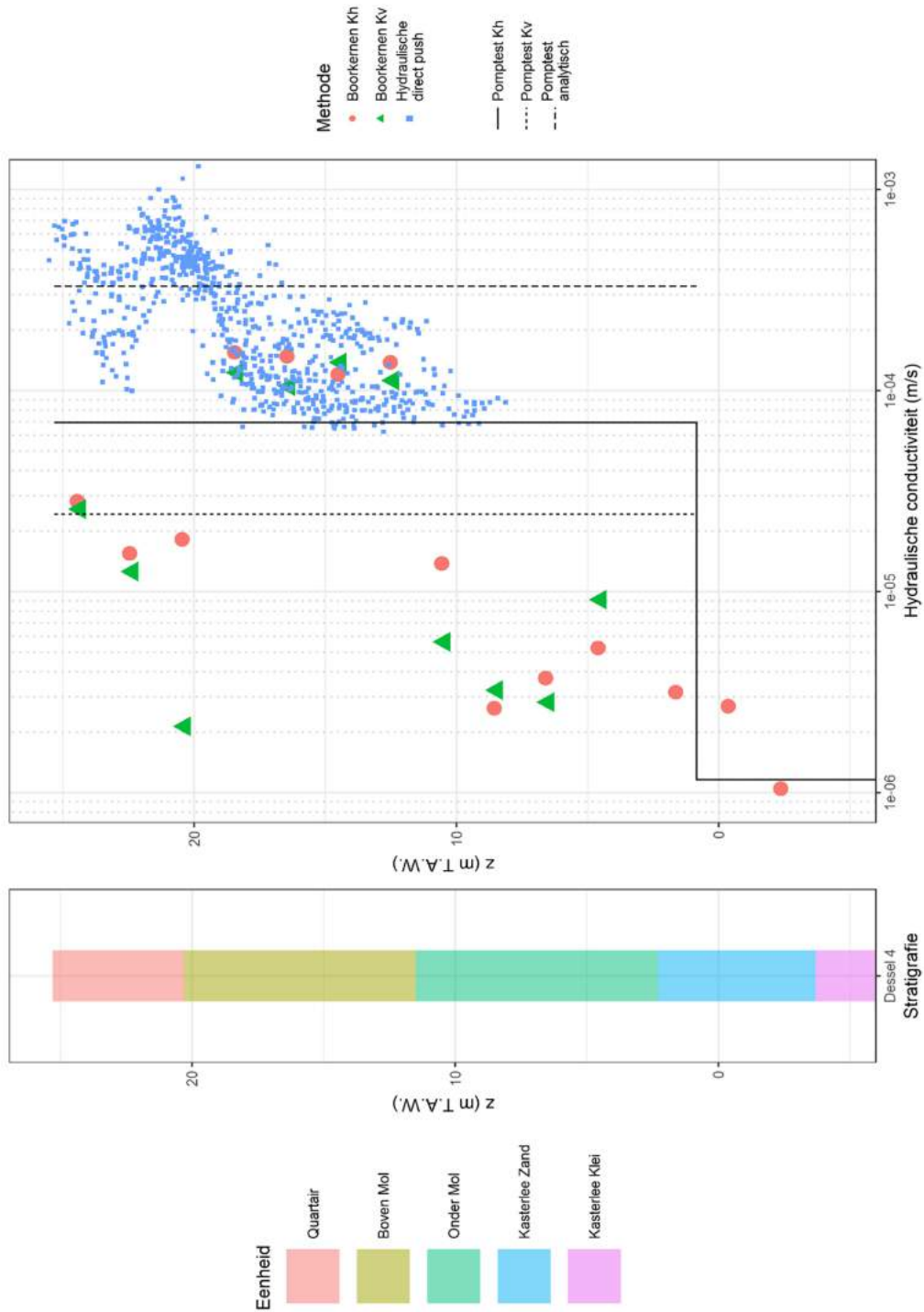
---

<sup>39</sup> Eerste monstername voor analyse met Kopecky ringen op ongeveer 7,5 m onder maaiveld, eerste korrelgrootteverdeling verricht op ongeveer 4,5 m onder maaiveld.





Figuur 4 - 84: Samenvatting van K-waarden in functie van de diepte verkregen ter hoogte van de ON-Dessel-2 boring, inclusief een vergelijking met de data van de 'Direct Push' testen (Kh: horizontale hydraulische geleidbaarheid (m/s); Kv: verticale hydraulische geleidbaarheid (m/s)).



Figuur 4 - 85: Samenvatting van K-waarden in functie van de diepte verkregen ter hoogte van de ON-Dessel-4 boring, inclusief een vergelijking met de data van de direct push testen (Kh: horizontale hydraulische geleidbaarheid (m/s); Kv: verticale hydraulische geleidbaarheid (m/s)).

## 2. Vergelijking van metingen op boorkernen en in ontsluitingen

In [R4-129] wordt de vergelijking gemaakt tussen de labo-metingen op de boorkernen (Kopecky<sup>40</sup>), en dezelfde labo-metingen (Kopecky) alsook luchtpermeametermetingen (met een draagbare TinyPerm II) in ontsluitingen van dezelfde geologische eenheden. De resultaten tonen aan dat er inderdaad een systematische afwijking is tussen metingen op boorkernen en in ontsluitingen. Voor de Mol Formatie resulteren de boorkernen in hydraulische geleidbaarheden die ongeveer een grootteorde kleiner zijn dan deze voor de ontsluitingen.

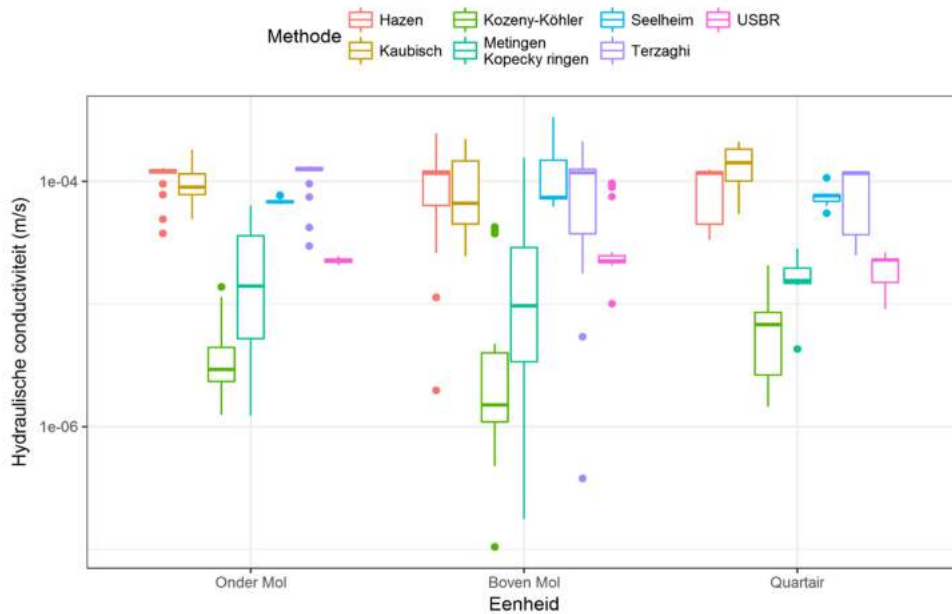
## 3. Schattingen op basis van korrelgrootte

Een derde bron van informatie uit de boorkernen, met betrekking tot de hydraulische geleidbaarheid, zijn de korrelgrootteverdelingen. Deze bieden niet rechtstreeks een idee over de hydraulische geleidbaarheid, maar hangen er wel sterk mee samen. In de literatuur bestaan verschillende methodes om de hydraulische geleidbaarheid te schatten op basis van korrelgrootteverdelingen. Deze methodes werden geëvalueerd en toegepast op de korrelgrootteanalyses uit de terreincampagne van 2008 [R4-130]. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 4 - 86, samen met deze van de labo-metingen op monsters van de boorkernen. Hieruit blijkt duidelijk dat de meeste methoden uit de literatuur hydraulische geleidbaarheden verwachten die ongeveer een grootteorde boven deze van de labo-metingen liggen. Dit zou opnieuw kunnen wijzen op systematische afwijkingen op data van de boorkernen, en komt toevallig ongeveer overeen met de systematische afwijking van één grootteorde tussen ontsluitingen en de boorkernen.

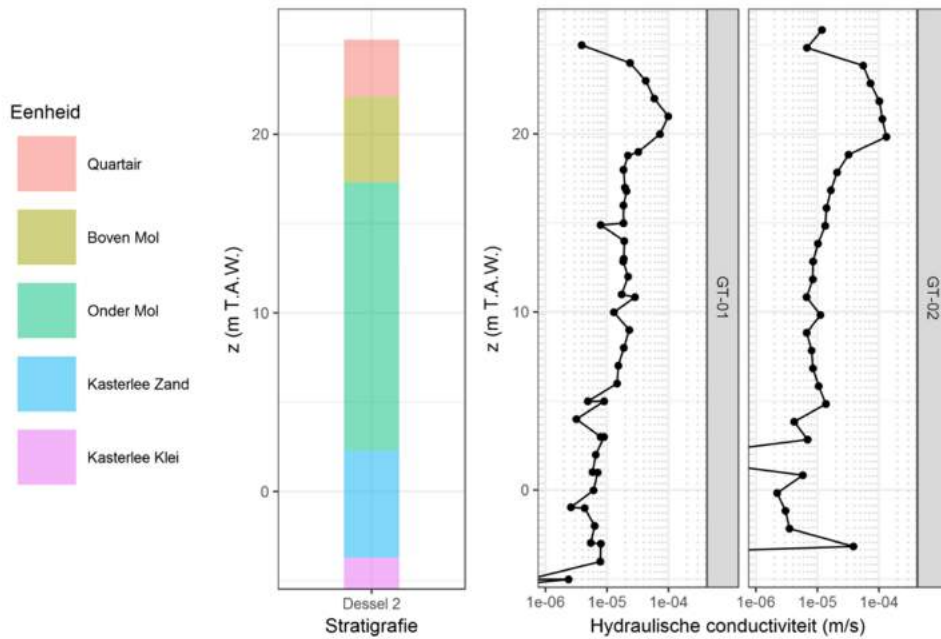
Er werd verder een site-specifiek model opgesteld om hydraulische geleidbaarheden te schatten op basis van korrelgrootteverdelingen. Hiervoor werden de resultaten van de labo-metingen gebruikt, waardoor er dus geen systematische afwijking met deze resultaten bekomen werd. Dit model werd vervolgens toegepast op de korrelgrootteanalyses van de geotechnische boringen, waarvoor geen data over de hydraulische geleidbaarheid beschikbaar is. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 4 - 87. De hoge hydraulische geleidbaarheden van de grove Boven-Mol zanden zijn duidelijk ook aanwezig ter hoogte van de geotechnische boringen. Het verschil tussen de hoogste waarden en de Onder-Mol Zanden eronder bedraagt hier opnieuw een factor 5 tot 10. Omdat de schatting echter gebeurde op basis van de labo-metingen op de stalen van de boorkernen zit hier evenzeer mogelijk een afwijking op, en kunnen we de absolute waarden van deze schattingen in vraag stellen. Op de locaties van de geotechnische boringen blijkt de grove, goed doorlatende laag in Boven-Mol dus duidelijk aanwezig te zijn, en het contrast tussen deze laag en de Onder-Mol zanden is gelijkaardig aan de hierboven besproken data.

---

<sup>40</sup> Gestandaardiseerde dunwandige cilinder met 50 mm inwendige diameter en een hoogte van 51 mm waarmee ongeroerde monsters kunnen worden genomen.



Figuur 4 - 86: Vergelijking tussen een selectie van methodes uit de literatuur voor het schatten van de hydraulische geleidbaarheid (m/s) op basis van korrelgrootteverdelingen en de labo-metingen op stalen van de boorkernen, voor de boringen uit de terreincampagne van 2008 [R4-130]. Deze boringen zijn ON-Dessel-3, ON-Dessel-4, ON-Dessel-5, ON-Retie-1, ON-Retie-2, ON-Kasterlee-1 en ON-Geel-1.



Figuur 4 - 87: Selectie van de resultaten van de schatting van hydraulische geleidbaarheid (m/s) voor de GT-01 en GT-02 boringen, op basis van het door [R4-130] ontwikkeld site-specifiek model.

### **Pomptesten**

Er werden in de directe omgeving van de bergingsite twee grootschalige pomptesten uitgevoerd tijdens de terreincampagnes van 2002 en 2008, met interpretaties mogelijk relevant voor de bovenste aquifer. Dit zijn de ON-Dessel-2 pomptest, uitgevoerd op een speciaal geboorde pompput, en de pomptest in de bovenste filter van de peilbuizen geïnstalleerd in het boorgat van ON-Dessel-4. De waarden verkregen op basis van de pomptesten, gerapporteerd in §7.3.2 van [OD-051], zijn weergegeven in Figuur 4 - 84 en Figuur 4 - 85. Voor ON-Dessel-4 blijken deze resultaten systematisch groter te zijn dan de waarden op basis van de boorkernen, met uitzondering van de zone tussen 12 en 20 m TAW. Voor ON-Dessel-2 lijkt dit minder het geval, maar de grotere hydraulische geleidbaarheid in Boven-Mol komt er wel tot uiting.

In principe zouden pomptesten de meest relevante waarden moeten opleveren met betrekking tot de hydraulische geleidbaarheid omdat een groter volume wordt getest. Toch kunnen de resultaten van deze twee pomptesten niet volledig gebruikt worden om de hydraulische geleidbaarheid van het Quartair & Boven-Mol af te leiden.

De filter van de pompput voor de ON-Dessel-2 pompproef bevindt zich onder de Kasterlee Klei, in de onderste aquifer (zie Figuur 4 - 82 en Figuur 4 - 83). De pompproef was dan ook ontworpen met als doel de karakterisatie van de Kasterlee Klei. De gerapporteerde waarden geven de resultaten van de inverse modellering [R4-131], maar omwille van de locatie van de filter van de pompput, en het feit dat in de bovenste aquifer enkel op enkele ondiepe putten (met filters op de grens tussen Quartair & Boven-Mol en Onder-Mol & Kasterlee Zand) het grondwaterpeil geobserveerd werd, zit er een grote onzekerheid op de verkregen hydraulische geleidbaarheden.

De minst diepe filter van de ON-Dessel-4 boring, waar de pompproef in plaatsvond, bevindt zich al vrij diep in de Onder-Mol & Kasterlee Zand eenheid (zie Figuur 4 - 82). Het is onwaarschijnlijk dat de grote hydraulische geleidbaarheid in de Boven-Mol Zanden veel aan de reactie van het waterpeil in de peilbuis bijgedragen heeft. Bij de discussie van de resultaten van deze pompproef is de conclusie dan ook dat verdere analyses nodig zijn om de geschiktheid van de interpretatie op basis van een numeriek model te kunnen bevestigen [OD-051]. In de overzichtskaarten met betrekking tot de resultaten van de pomptesten werd besloten om de ON-Dessel-4 resultaten niet op te nemen.

Uit de resultaten van alle pomptesten uit de 2002 en 2008 terreincampagnes konden de hydraulische geleidbaarheden van het Quartair & Boven-Mol eenheid niet apart afgeleid worden omwille van de diepte van de filters waarop de tests zijn uitgevoerd. Aparte geleidbaarheidswaarden konden wel afgeleid worden voor de samengevoegde Onder-Mol en Kasterlee Zand eenheden (§7.3.3 in [OD-051]).

### **‘Direct Push’ testen**

In het kader van een PhD onderzoek ([R4-127], [R4-128]) zijn er in april, mei en september 2012 verschillende hydraulische ‘Direct Push’ metingen in de directe omgeving van de bergingsinstallatie uitgevoerd door UFZ Leipzig (zie Figuur 4 - 81). ‘Direct Push’ is in feite een algemene benaming voor technieken waarbij staven met sensoren of staalname apparatuur de grond in gedrukt worden, vergelijkbaar met de klassieke sonderingen (CPT). Er wordt hierbij dus niet geboord, maar gehamerd en het dieptebereik is dan ook sterk afhankelijk van de ondergrond. In het laatste decennium werden specifieke ‘direct Push’ technieken ontwikkeld om relatieve hydraulische geleidbaarheden *in situ* veelvuldig en snel te kunnen opmeten. Het betreft de volgende technieken:

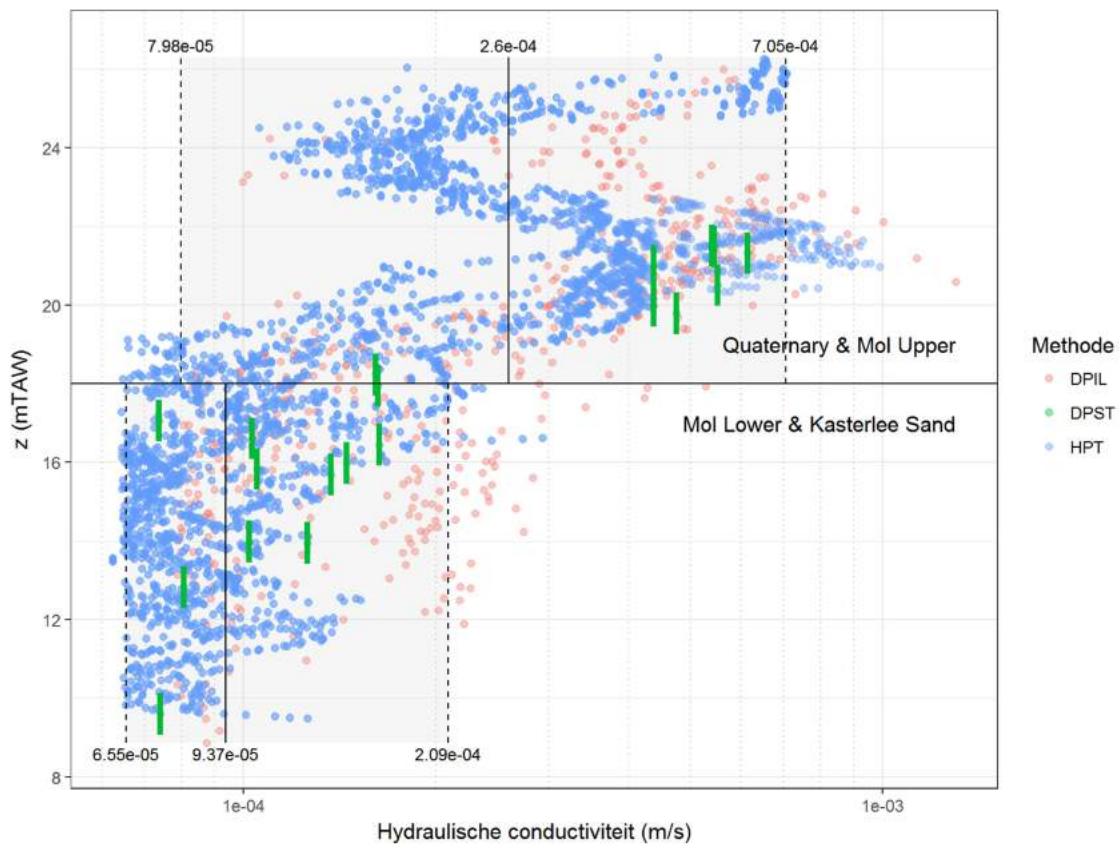
- ‘Direct Push injection logging’ (DPIL: [R4-132], [R4-133], [R4-134], [R4-135] & [R4-136])
- de ‘hydraulic profiling tool’ (HPT: [R4-137], [R4-138] & [R4-139])
- standaard ‘Direct Push slug tests’ (DPST: [R4-140], [R4-141]) waarvan absolute hydraulische geleidbaarheden afgeleid worden (zie ook [R4-133], [R4-134] & [R4-135]).

De verkregen relatieve hydraulische geleidbaarheden met de DPIL en HPT technieken werden vervolgens gekalibreerd met de resultaten van de DPST testen. Deze kalibratietechniek is beschreven in [R4-127]. De DPIL en HPT technieken hebben een zeer klein meetvolume omdat ze bijna continu meten tijdens het indrukken van de stangen (een meting om de enkele centimeters). Voor de DPST testen werd een filterlengte van 1,06 m gebruikt. Het grotere meetvolume dat daarmee bereikt werd, is meer representatief dan dat voor de DPIL en HPT metingen. Vermits deze metingen echter gekalibreerd werden met de DPST data, zijn alle resultaten in principe representatief voor een groter meetvolume, dat uiteraard wel nog duidelijk kleiner is dan het geteste volume tijdens een pompproef.

Al de meetresultaten worden in Figuur 4 - 88 getoond, samen met de geometrisch gemiddelde hydraulische geleidbaarheid en de 95% betrouwbaarheidsintervallen. De opsplitsing tussen het Quartair & Boven-Mol en Onder-Mol & Kasterlee Zand wordt hier gemaakt op basis van de geometrie van deze hydrogeologische eenheden in het numeriek model. Omdat de ‘Direct Push’ metingen ongeveer 17 m diepte bereiken, zijn er hiervan geen waarden voor het onderste deel van Onder-Mol en dieper. De resultaten tonen duidelijk aan dat in de omgeving van de bergingssite eerst een ondiepe zone voorkomt met hogere hydraulische geleidbaarheden, en dieper, hydraulische geleidbaarheden die geleidelijk aan dalen. Het verschil tussen de grootste geobserveerde waarden in de bovenste zone en de waarden in de onderste zone bedraagt ongeveer een factor 5 tot een factor 10.

Het ontbreken van waarden beneden een bepaalde drempel voor de HPT metingen is een gevolg van het stilvallen van de injectie van water aan een druk van 570 – 590 kPa. In werkelijkheid zullen er dus zeker zones zijn met een hydraulische geleidbaarheid kleiner dan deze drempel (volgens de HPT metingen), maar gezien het grote bereik aan meetwaarden die wel nog verkregen werden in deze zone, is de invloed van dit effect verwaarloosbaar.

In Figuur 4 - 84 en Figuur 4 - 85 zijn deze data ook weergegeven, wat duidelijk maakt dat er een systematische afwijking is tussen deze resultaten en deze op basis van de boorkernen, van ongeveer één grootteorde.



Figuur 4 - 88: Overzicht van de resultaten van de hydraulische 'Direct Push' metingen (DPIL: *direct push injection logging*; DPST: *direct push slug tests* (lengte van de groene lijnen geeft de diepte-omvang van de meting weer); HPT: *hydraulic profiling tool*). De zwarte volle verticale lijnen geven de gemiddelde hydraulische geleidbaarheid (K) en zijn 95% betrouwbaarheidsintervallen voor de bovenste twee modellagen (stippellijnen).

### Literatuurwaarden

In Tabel 4 - 55 worden enkele waarden voor de bovenste aquifer, de Formatie van Mol of de Boven-Mol eenheid uit de literatuur gegeven, naast enkele cijfers met betrekking tot de hierboven besproken data. VMM vermeldt een bereik van hydraulische geleidbaarheden voor de Formatie van Mol gaande van 0,5 tot 30 m/d [R4-142]. Vandersteen et al. [R4-143] spreken in hun overzicht van hydraulische geleidbaarheden voor heel Noord België dan weer over een range van 0,16 tot 44,4 m/d. Rogiers et al. [R4-129] vonden waarden van 8 tot 61 m/d voor een ontsluiting van de Mol Zanden. Hoedemaekers [R4-144] berekende op basis van slug testen een waarde van 13 m/d in de L-28a peilput en L-25a peilput ter hoogte van het kanaal (zie Figuur 4 - 93 voor de ligging van de peilputten). Tot slot vermeldden Wouters en Vandenberghé [R4-36] nog ranges van 9 tot 26 m/d voor de Zanden van Mol, Brasschaat en Merksplas, en 6 tot 17 m/d voor Neogeen zanden in het algemeen.

**Tabel 4 - 55: Overzicht van verschillende waarden voor de hydraulische geleidbaarheid (K in m/d) van de bovenste aquifer.**

K (m/d)	Techniek/Bron	Filter/staal in	Waarde voor
5,5-55	Direct push testen, in situ	Quartair / Boven-Mol / Bovenste deel Onder-Mol	Quartair / Boven-Mol / bovenste deel Onder-Mol
10	ON-Dessel-2 pompproef, in situ	Diest Zanden	Bovenste eenheid (~Boven-Mol)
6	ON-Dessel-4 pompproef, in situ (model)	Kasterlee	Quartair + Mol + Kasterlee
28	ON-Dessel-4 pompproef, in situ (analytische benadering)	Kasterlee	Quartair + Mol + Kasterlee
10 – 14	ON-Dessel-4 Kopecky ringen van boorkernen, ex situ	Boven-Mol	Boven-Mol
0,6 – 3,1	ON-Dessel-2 Kopecky ringen van boorkernen (andere terreincampagne!), ex situ	Boven-Mol, onder de grove zone (duidelijk te zien aan korrelgroottes)	Boven-Mol
0,5 - 30	VMM [R4-142]	-	Mol
0,16 – 44,4	Vandersteen <i>et al.</i> [R4-143]	-	Mol
8 – 61	Rogiers <i>et al.</i> (2013b), luchtpermeameter + labo metingen	Mol, ontsluiting in Sibelco groeve	Mol
13	Hoedemaekers [R4-144], in situ, slug-testen	L-28a (dilutietestput), L-25a (kanaal)	Mol
9 - 26	Wouters en Vandenberghe [R4-36]	-	Zanden van Mol, Brasschaat en Merksplas
6 - 17	Wouters en Vandenberghe [R4-36]	-	Neogeen zanden

### Vergelijking van de verschillende resultaten

Een samenvatting van alle hierboven besproken waarden voor de hydraulische geleidbaarheid wordt weergegeven in Figuur 4 - 89. Hierin is duidelijk de systematische afwijking, tot een grootteorde, tussen de 'Direct Push' metingen en de data op basis van de boorkernen te zien. De waarden verkregen uit de pomptesten liggen aan de hoge kant van deze van de boorkernen, en aan de lage kant van deze van de 'Direct Push' testen. Zoals hierboven reeds vermeld, komt deze afwijking van een grootteorde overeen met de systematische afwijking tussen de boorkernen en data voor ontsluitingen, beschreven door [R4-145]. Ook komt deze afwijking overeen met het verschil tussen klassieke schattingen van de hydraulische geleidbaarheid op basis van korrelgrootteverdelingen en de labo-metingen.

De waarden verkregen uit de literatuur zijn eveneens weergegeven in Figuur 4 - 89. Hier blijkt echter een betere overeenkomst te zijn met de 'Direct Push' testen, hoewel tweemaal toch een groot deel van het vermelde bereik onder de minimumwaarden van de 'Direct Push' testen valt.

### Verder te beschouwen bereik van hydraulische geleidbaarheid op basis van metingen

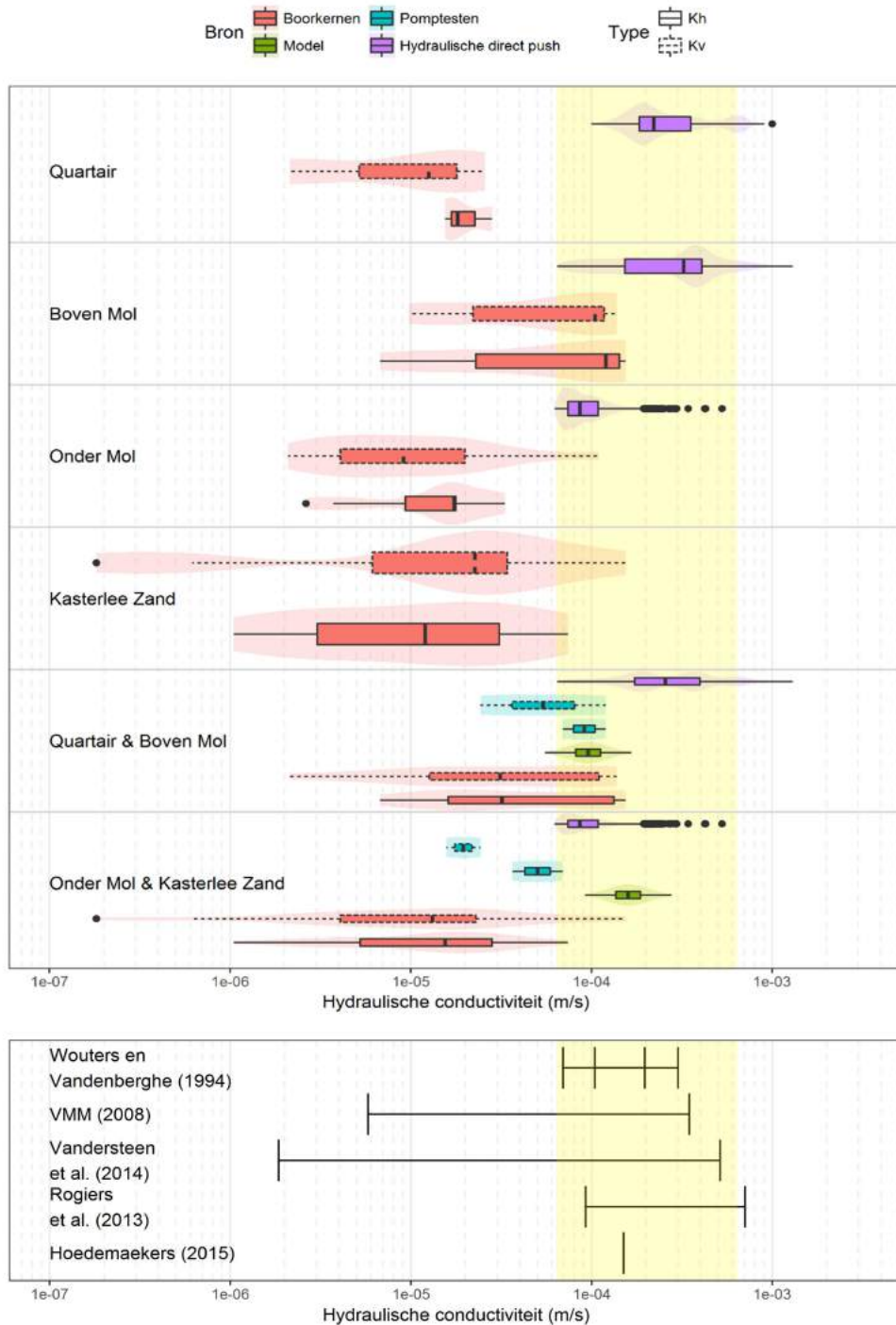
De terreincampagnes van 2002 en 2008 waren vooral bedoeld om een algemene karakterisatie van de eerste 50 meter van de Neogeen aquifer te verkrijgen, waarbij er vaak extra of uitsluitend aandacht was voor het bepalen van de eigenschappen van de Kasterlee Klei. De eerste 15 meter van de bovenste aquifer werd slechts door bepaalde technieken gekarakteriseerd, waarbij de grove Boven-Mol Zanden soms letterlijk overgeslagen werden. Uit de korrelgrootteanalyses, de daarop gebaseerde schattingen van hydraulische geleidbaarheid, blijkt echter dat



deze grove laag wel degelijk aanwezig is onder de bergingssite, en een aanzienlijk deel uitmaakt van de eerste 15 meter van de aquifer.

De 'Direct Push' metingen van 2012 hebben de aanwezigheid van deze laag bevestigd, maar evenzeer duidelijk gemaakt dat de hydraulische eigenschappen hiervan ook van groot belang zijn. Gezien de beperkingen van de terreincampagnes van 2002 en 2008 (in dit opzicht), de vragen bij de verstoring van de boorkernen, en de beperkte informatie die de uitgevoerde pomptesten kunnen leveren over de eerste 15 meter van de aquifer, worden de 'Direct Push' metingen voorlopig als de meest betrouwbare bron van informatie van de hydraulische geleidbaarheid van "Quartair & Boven-Mol" ter hoogte van de bergingssite en zijn omgeving beschouwd. Het feit dat het hier om vrij hoge hydraulische geleidbaarheden lijkt te gaan, in vergelijking met de gegevens uit 2002 en 2008, wordt deels bevestigd door de verschillende bereiken vermeld in de literatuur. Deze overlappen voor een groot deel met het bereik van de 'Direct Push' metingen voor het Quartair & Boven-Mol ter hoogte van de bergingssite, waarvoor we 5,5 – 55 m/d ( $6,4 \times 10^{-5}$  –  $6,4 \times 10^{-4}$  m/s) gebruiken, met een geometrisch gemiddelde van dit bereik van 17 m/d (Figuur 4 - 89). Dit bereik is bepaald als een afgerond minimum en maximum na verwijderen van de 5% hoogste waarden. Verder ondersteunen de systematische afwijkingen tussen de boorkernen en de ontsluitingen en schattingen op basis van korrelgrootteverdelingen, de 'Direct Push' data.

De range 5,5 – 55 m/d, en het geometrisch gemiddelde 17 m/d, werd verder bijvoorbeeld ook gebruikt voor de interpretaties van de dilutietesten en leidde tot resultaten consistent met de gemeten Darcy fluxen en hydraulische gradiënten in de directe omgeving van de bergingssite (zie ook §4.6.2.7.4).



Figuur 4 - 89: Viool- en boxplots voor verschillende methodes en types van metingen van de hydraulische geleidbaarheid (m/s) en bereiken vermeld in de literatuur. De boxplots geven de uitschieters weer (meer dan 1,5 keer de interkwartielafstand verwijderd van het 1<sup>ste</sup> of 3<sup>de</sup> kwartiel), de kleinste en grootste niet-uitschieters, en het 1<sup>ste</sup>, 2<sup>de</sup> en 3<sup>de</sup> kwartiel. De gele achtergrond geeft het bereik 5,5 – 55 m/d weer.

#### 4.6.2.6.3 Argumentatie voor de hydraulische geleidbaarheidswaarden gebruikt in het model

##### Startwaarden voor de automatische kalibratie

Vermits het Lokaal grondwatermodel een regio omvat van ongeveer 60 km<sup>2</sup>, is het niet mogelijk om gemeten hydraulische geleidbaarheden rechtstreeks als parameterwaarden te gebruiken. Zowel het schaaffect, als een bias met betrekking tot de onderzochte locaties en de volledige regio, verhinderen dat een gemiddelde waarde van de metingen zou overeenkomen met de effectieve hydraulische geleidbaarheid op schaal van het numeriek model. Er dient dus een kalibratie te gebeuren van de parameterwaarden om deze effectieve hydraulische geleidbaarheid te bekomen. De parameterwaarden worden gekalibreerd zodat de gesimuleerde stijghoogtes in zo goed als mogelijk overeenstemmen met gemeten stijghoogtes.

Voor een initiële ruwe schatting van de effectieve hydraulische geleidbaarheden kan wel gebruik gemaakt worden van de meest relevante metingen, i.e. deze die het grootste volume van de aquifer karakteriseren. Bij de bepaling van de startwaarden van de input-parameters van het numeriek model werden dan ook de resultaten van de pomptesten<sup>41</sup> gebruikt voor de bovenste aquifer, i.e. deze vermeld in de samenvattende tabel 2-13 (§2.1.2.8.5) van [OD-051]. Een selectie van deze waarden is weergegeven in Tabel 4 - 56. Het gaat hier dus om gemiddelde waarden van alle pompproeven uit de 2002 en 2008 terreincampagnes. Dit is in feite de enige rechtstreekse link tussen de parameterwaarden uit het model en de gemeten hydraulische geleidbaarheden, en die link verdwijnt in principe bij de automatische kalibratie van de parameterwaarden.

##### Resultaten van de automatische kalibratie

Voor de automatische kalibratie van de parameterwaarden van het numeriek model werd slechts één parameter gebruikt voor de bovenste aquifer om zo ook de informatie vervat in de stijghoogtemetingen in rekening te brengen. De verhouding tussen enerzijds de hydraulische geleidbaarheid van de bovenste aquifer en anderzijds de hydraulische geleidbaarheden voor ‘Quartair & Boven-Mol’ en deze voor ‘Onder-Mol & Kasterlee Zand’ werd constant gehouden om overparameterisatie van het model te vermijden (zie §2.1.2.8.2, Tabel 2-9 in [OD-026]). Deze verhouding (en deze voor de verschillende eenheden binnen de onderste aquifer) vormen de enige informatie van de gemeten hydraulische geleidbaarheden die expliciet behouden wordt in het uiteindelijk gekalibreerde resultaat. Gekalibreerde parameters omvatten de hydraulische geleidbaarheid van de bovenste aquifer, de verticale anisotropie van de Kasterlee Klei en de hydraulische geleidbaarheid van de onderste aquifer (Tabel 4 - 56).

De automatische kalibratie leidde ook tot kansdichtheidsfuncties voor de gekalibreerde parameters (zie Annex 2, §32, Tabel A2.14 van [OD-037]), waaronder dus de hydraulische geleidbaarheid van de bovenste aquifer. De kansdichtheidsfunctie voor de hydraulische geleidbaarheid van de bovenste aquifer werd toegepast op de hydraulische geleidbaarheid van “Quartair & Boven-Mol” en “Onder-Mol & Kasterlee Zand”. Daarbij werd de gemiddelde waarde voor de hydraulische geleidbaarheid voor “Quartair & Boven-Mol” en “Onder-Mol & Kasterlee Zand” verkregen uit de gekalibreerde waarde voor het geheel van de bovenste aquifer ( $1,6 \times 10^{-4}$  m/s, zie Tabel 4 - 56), door middel van de constant gehouden verhoudingen afgeleid van de startwaarden van de parameters (respectievelijk 0,6 en 1, zie §2.1.2.8.2, Tabel 2-9 van [OD-026]). In Figuur 4 - 89 is de

---

<sup>41</sup> Uitgevoerd op de boorlocaties ON-Dessel-2, ON-Dessel-3 en ON-Retie-2

kansdichtheidsfunctie voor de hydraulische geleidbaarheid van Quartair & Boven-Mol en Onder-Mol & Kasterlee Zand gevisualiseerd in de dataset “Model”. De hydraulische geleidbaarheden voor de bovenste aquifer kunnen op basis van de kansdichtheidsfunctie variëren van ongeveer 58% van hun gekalibreerde waarde tot 173% ervan. De onzekerheid op de bekomen parameterwaarden is dus minder dan een factor twee.

De uiteindelijke waarden van belang in het kader van de voornaamste migratieweg tot de waterput op 70 m bedragen  $9,6 \times 10^{-5}$  m/s (of 8,3 m/d) voor Quartair & Boven-Mol, en  $1,6 \times 10^{-4}$  m/s (of 13,8 m/d) voor Onder-Mol & Kasterlee. Beide waarden vallen binnen het beschouwde bereik van 5,5 tot 55 m/d. Het geometrisch gemiddelde van dit bereik, 17 m/d, ligt echter boven de gekalibreerde waarden van het model. Desondanks blijkt er een goede overeenstemming te zijn tussen de gemeten en de gesimuleerde grondwaterfluxen (zie §4.6.2.7.4 “ruimtelijke verdeling op basis van gradiënt en hydraulische geleidbaarheid”), dus wordt er weinig impact op de radionuclideconcentraties verwacht. Verder blijkt evenzeer dat de gekalibreerde waarden in het model een goede schatting van de impact opleveren op basis van het gemiddelde van 17 m/d. Het plausibele bereik van 5 tot 55 m/d geeft aanleiding tot een onzekerheid van een factor 3 op de grondwaterflux, en dus ook op potentiële radionuclideconcentraties. In de praktijk is de onzekerheid op de gekalibreerde waarden echter veel kleiner (zie §4.6.2.6.4). Het model kan dus gebruikt worden om een geotransferfactor af te leiden.

**Tabel 4 - 56: Startwaarden en gekalibreerde waarden voor de parameters met betrekking tot de bovenste aquifer in het numeriek model (met de finaal gebruikte uniforme Kasterlee Klei conceptualisatie). VANI staat voor verticale anisotropie.**

Parameter	Startwaarde	Gekalibreerde waarde	95% Betrouwbaarheid interval
<b>Gekalibreerde parameters</b>			
K bovenste aquifer [m/s]	$4,1 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4} - 2,6 \times 10^{-4}$
Kasterlee Klei VANI [-]	100,0	148,0	1 - 351
K onderste aquifer [m/s]	$6,5 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-5} - 2,2 \times 10^{-5}$
<b>Afgeleide parameterwaarden</b>			
Quartair & Boven-Mol [m/s]	$2,4 \times 10^{-5}$	$9,6 \times 10^{-5}$	
Mol Kleiige Laag [m/s]	$2,7 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	
Onder-Mol & Kasterlee Zand [m/s]	$4,1 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-4}$	

#### 4.6.2.6.4 Impact van de onzekerheden op de radionuclideconcentraties

##### Onzekerheden op K op basis van lokale metingen in het ‘Quartair & Boven-Mol’.

Vermits het finaal beschouwde bereik van meetwaarden voor de hydraulische geleidbaarheid voor ‘Quartair & Boven-Mol’ 5,5 tot 55 m/d bedraagt, met een geometrisch gemiddelde van 17 m/d, kunnen we trachten de impact van deze waarden op de radionuclideconcentraties in te schatten. Dit wordt volledig uitgewerkt in §4.6.2.7.4 (deel “Impact op potentiële radionuclideconcentraties”), met behulp van een lokaal geschatte geotransferfactor.

## Onzekerheden op basis van het numeriek model

### Parameteronzekerheden

Het effect van de onzekerheden op de hydraulische geleidbaarheid uit het numeriek model op de potentiële radionuclideconcentraties kan gekwantificeerd worden met behulp van dezelfde aanpak als deze uitgewerkt in §4.6.2.7.4 (deel “Impact op potentiële radionuclideconcentraties”). De lokaal geschatte geotransferfactor is er gelijk aan het omgekeerde van de grondwaterflux onder de bergingsinstallatie. Indien we ervan uitgaan dat de hydraulische gradiënt constant blijft, dan wil dit zeggen dat de impact in termen van potentiële radionuclideconcentraties, gekwantificeerd door  $1/Q_{in}$ <sup>42</sup> (zie §4.6.2.7.4 deel “Impact op potentiële radionuclideconcentraties”), kan variëren van 58% tot 173% van zijn referentiewaarde (zie onzekerheid vermeld in §4.6.2.6.3) omwille van bovenstaande onzekerheid op de parameterwaarden. Dit is dus een onzekerheid op de geotransferfactor kleiner dan een factor twee. In de praktijk zouden aanpassingen aan de parameterwaarden in het numeriek model echter leiden tot andere hydraulische gradiënten, waardoor de gesimuleerde grondwaterflux onder de bergingsinstallatie weinig zou veranderen. De grondwatervoeding wordt immers als een constante beschouwd, wat betekent dat indien dezelfde stromingspatronen behouden blijven, de grondwaterflux slechts in beperkte mate kan veranderen door veranderingen van de hydraulische geleidbaarheid. De mogelijke impact van deze onzekerheden op potentiële radionuclideconcentraties is dus waarschijnlijk veel kleiner dan een factor 2.

Het modelconcept heeft echter een invloed op de onzekerheden van de parameterwaarden. De twee meest relevante zaken hier, met betrekking tot de simulatie van de huidige situatie onder het huidige klimaat, zijn de conceptualisaties van het grof Boven-Mol facies en de Kasterlee Klei.

### Ontbreken van Grof Boven-Mol in numeriek model

Het ontbreken van de grote hydraulische geleidbaarheden ter hoogte van de bergingsite, te wijten aan de afwezigheid van het grof Boven-Mol facies in het numeriek model, is in principe conservatief. De hydraulische geleidbaarheid in het numeriek model is momenteel kleiner dan gemeten, dus wordt de flux onderschat en de geotransferfactor overschat. Deze te kleine hydraulische geleidbaarheden worden echter gecompenseerd door een overschatting van de hydraulische gradiënt ter hoogte van de bergingsinstallatie (zie [R4-147]), waardoor de gesimuleerde grondwaterflux waarschijnlijk weinig invloed ondervindt van het ontbreken van het Grof Boven-Mol. De gebruikte waarde voor de grondwatervoeding blijft immers constant. Dit blijkt ook uit de analyse van de stroomsnelheden (zie §4.6.2.7.4). Wat wel kan verwacht worden, is dat het stromingspatroon zal veranderen, en meer bepaald waarschijnlijk de verticale verdeling van de potentiële radionuclideconcentraties over de bovenste aquifer. Ter hoogte van de bergingsinstallatie blijkt het ondiepe gedeelte van de bovenste aquifer immers een grotere geleidbaarheid te bezitten dan het diepere gedeelte, wat nu omgekeerd in het numeriek model verwerkt zit. Het lijkt dan zeer waarschijnlijk dat de pluim zich nog minder diep zal verspreiden, wat het belang van de grote hydraulische geleidbaarheden alleen maar zal doen toenemen. Dit wordt verder onderzocht en uitgewerkt vóór de tweede wetenschappelijke raad.

---

<sup>42</sup>  $Q_{in}$  is het instromend debiet in de beschouwde sectie onder de tumulus.

### Conceptualisatie van de Kasterlee Klei

Het Lokale grondwatermodel werd herzien op basis van gegevens bekomen tijdens de meest recente terreinverkenningen, waarbij een doorgedreven conceptualisatie van de Kasterlee Klei werd doorgevoerd. Bij de modelcalibratie werd snel duidelijk dat een spatiaal variabel hydraulisch geleidbaarheidsveld, afgeleid uit een combinatie van CPT gegevens en hydraulische geleidbaarheidsmetingen, niet compatibel was met de geobserveerde hydraulische gradiënten doorheen de Kasterlee Klei. Daarom werden twee additionele hydraulisch geleidbaarheidsvelden geëvalueerd. De eerste omvat één enkele hydraulisch geleidbaarheidswaarde voor de volledige eenheid, de andere bestaat uit een automatische kalibratie van de hydraulisch geleidbaarheidswaarden. Bij deze laatste worden verschillende gebieden afgelijnd op basis van de diktes van de verschillende eenheden en binnen elk homogeen verondersteld gebied wordt een geoptimaliseerde hydraulisch geleidbaarheidswaarde bepaald (voor meer detail, zie ook §2.2.4.1 van [OD-026]).

### **Conclusies**

Het conceptueel hydrogeologisch model omvat twee lokale fenomenen. De Mol Kleiige Laag blijkt hier niet van belang te zijn en is ook niet aanwezig ter hoogte van de bergingsite. Het grof Boven-Mol facies blijkt duidelijk aanwezig te zijn ter hoogte van de bergingsite en vertoont sterk afwijkende hydraulische geleidbaarheden, maar is momenteel niet in het numeriek model opgenomen. De impact hiervan op de grondwaterflux blijkt echter klein te zijn omwille van een compensatie door de overschatte hydraulische gradiënt (zie §4.6.2.7.4 “ruimtelijke verdeling op basis van gradiënt en hydraulische geleidbaarheid”).

De belangrijkste zone van de aquifer, in het licht van potentiële radionuclideconcentraties, is de eerste 15 meter ter hoogte van de bergingsite en de zone tot 70 m ten noorden ervan, waar verondersteld wordt dat er zich een waterput bevindt. Het te beschouwen bereik van hydraulische geleidbaarheden, op basis van metingen, in deze zone is 5,5 – 55 m/d. Deze waarden worden ondersteund door waarden vermeld in de literatuur. Het effect van dit bereik aan meetwaarden op potentiële radionuclideconcentraties wordt in §4.6.2.7.4 deel “Impact op potentiële radionuclideconcentraties” behandeld.

De hydraulische geleidbaarheden in het numeriek model zijn effectieve waarden, geldig voor de hele gesimuleerde regio. Desondanks blijkt de gesimuleerde lokale grondwaterflux ter hoogte van de bergingsinstallatie correct te zijn. De onzekerheden op deze waarden over- of onderschatten de potentiële radionuclideconcentraties met minder dan een factor 2.

#### **4.6.2.6.5 Specifieke opslagcapaciteit**

De specifieke opslagcoëfficiënt<sup>43</sup>  $S_s$  ( $m^{-1}$ ) kan geschat worden op basis van de verlaging van het waterniveau in de niet-bepompte lagen tijdens een pompproef [OD-051]. Omwille van de benodigde hoeveelheid waarnemingspiëzometers, was deze schatting alleen mogelijk voor twee sites, één rond ON-Dessel-3, de andere rond ON-Retie-1 (Tabel 4 - 57).

---

<sup>43</sup> In het Engels “specific storage”

We spreken hier van specifieke opslagcapaciteit omdat deze waarden afgeleid zijn in de veronderstelling dat de aquifer ‘onder spanning’ staat ([OD-051]; p. 151). Deze veronderstelling is gebaseerd op het feit dat uit de kalibratie van de pompproef op peilbuis PB3 (Kasterlee Zand, site ON-Dessel-3) gebleken is dat de bovenste aquifer, zoals eerder als één geheel beschouwd, toch wel uit verschillende lagen bestaat<sup>44</sup> [R4-146]. De lage verticale doorlatendheid van de bovenste laag moet in het model gezien worden als een geheel waarbij deze verhoogde verticale weerstand gevormd wordt door één of meer dunne slecht doorlatende laagjes, bijvoorbeeld plaatselijke kleilenzen of een oxidatiehorizont. Uit de beschrijving van deze boring blijkt immers dat er een aantal granulometrisch fijnere laagjes en ook diffuse klei voorkomen in de bovenste 10 meters. Dit is ook het geval in ON-Retie-2 en in mindere mate in boring ON-Retie-1. Dit komt ook tot uiting in de interpretatie van de CPT's [R4-219]. Feit is wel dat de laag gevormd door het Kasterlee Zand zich hierdoor gedraagt als een min of meer gespannen watervoerende laag, zoals uit de verlagingscurve kan worden opgemaakt. Deze kenmerken komen enkel voor ten noorden van de bergingsite (Figuur 4 - 77). De bergingsite zelf wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een grover facies in het Boven-Mol. In de buurt van de bergingsite staat de bovenste aquifer niet onder spanning.

Deze waarden zijn dus veel kleiner dan de waarden voor de bergingscoëfficiënt nabij de watertafel, die ongeveer gelijk zijn aan de effectieve porositeit (zie §4.6.2.6.6).

**Tabel 4 - 57: Specifieke opslagcapaciteit  $S_s$  ( $m^{-1}$ ) geschat door gebruik te maken van een analytische methode bij de interpretatie van de de pomptests A1 (ON-Dessel-3) en A2 (ON-Retie-1), en veronderstelde bergingscoëfficiënt  $S_y$  (-) (op basis van §7.3.2.1 (table 48) van [OD-051])**

	Specifieke opslagcapaciteit				Specifieke bergingscoëfficiënt	
	ON-Dessel-3		ON-Retie-1		Geschat op basis van porositeit $S_y$ (-)	Finale waarde na kalibratie $S_y$ (-)
	# filters	$S_s$ ( $m^{-1}$ ) *	# filters	$S_s$ ( $m^{-1}$ ) *		
<b>Bovenste aquifer**</b>	4	$2,12 \times 10^{-5}$	4	$3,0 \times 10^{-5}$	0,3	0,36
<b>Onderste aquifer</b>	2	$2,4 \times 10^{-7}$	2	$9,5 \times 10^{-7}$	-	

\* Geometrisch gemiddelde van de geschatte waarden; \*\* Veronderstelling van voorwaarde ‘onder spanning’ twijfelachtig

#### 4.6.2.6.6 Specifieke bergingscoëfficiënt

De specifieke bergingscoëfficiënt<sup>45</sup> ( $S_y$ ) is in feite de porositeit die gedraineerd kan worden. De waarde daarvan zou dicht bij de (effectieve) porositeit moeten liggen voor de beschouwde sedimenten. De waarden van porositeit voor de bovenste aquifer (Tabel 4 - 53) variëren tussen 0,35 tot 0,42, terwijl de waarden van effectieve porositeit (uit twee stalen) van de bovenste aquifer 0,26 bedragen.

De waarde van de bergingscoëfficiënt voor de bovenste aquifer in het transiënt model bedraagt 0,36. In een *steady state* model, zoals voor de berekening van de GTF, wordt de specifieke bergingscoëfficiënt echter niet gebruikt.

<sup>44</sup> Om de pompproef Retie-1 te kunnen interpreteren was een grote verticale anisotropie noodzakelijk.

<sup>45</sup> In het Engels “specific yield”

#### 4.6.2.7 Grondwaterstroming: richting en snelheid

De bepaling van de grondwaterstroming op de site, i.e. de snelheid en richting van het grondwater in de bovenste aquifer, is enkel uitgevoerd voor de oostelijke tumulus. Door een grootschalige grondwaterbemaling bij FBFC International tijdens de jaren 2013-2016<sup>46</sup> was de natuurlijke situatie van het grondwater verstoord in het westelijke deel van de bergingsite en konden geen uitspraken betreffende stromingsrichting en –snelheid worden gedaan voor de westelijke tumulus.

##### 4.6.2.7.1 Langetermijngemiddelde van de grondwaterstroming op schaal van het Lokaal grondwatermodel

Het grondwatersysteem op de site in Dessel maakt deel uit van het regionale hydrogeologische systeem van het stroomgebied van de Nete. Binnen de grenzen van dit stroomgebied is de grondwaterstroming voornamelijk het gevolg van atmosferische infiltratie en in mindere mate van externe bronnen, meer bepaald de kanalen die water over de natuurlijke grenzen heen vervoeren. Het geïnfiltreerde water komt via het grondwater in de afvoerkanalen en rivieren terecht. De invloed van twee rivieren in de regio, de Kleine Nete/Witte Nete en de Grote Nete, reikt tot aan de Boomse Klei aquitard, die als ondergrens van het grondwatersysteem wordt beschouwd (Figuur 4 - 75).

De reden waarom het (geringe) effect van kleinere oppervlaktewaterlichamen op de grondwaterstroming beperkt blijft tot het bovenste gedeelte van het aquifersysteem (bovenste watervoerende laag), is de aanwezigheid van de Kasterlee Klei (zie ook §4.6.1.2.1). Deze aquitard tempert de invloed van het oppervlaktewater, voornamelijk rivieren, op de peilen van de diepere watervoerende lagen. Als gevolg daarvan is de grondwaterstroming in de onderste watervoerende laag meer uniform dan in de bovenste watervoerende laag. Figuur 4 - 90 geeft de grondwaterpeilen en grondwaterstromingsrichtingen weer zoals gesimuleerd door het Lokale grondwatermodel voor de hydrogeologische eenheden boven en onder de Kasterlee Klei. Hieruit blijkt dat de isolijnen van de grondwaterpeilen en grondwaterstromingsrichtingen veel meer fluctueren in de bovenste watervoerende laag dan in de onderste.

Afhankelijk van zijn relatief verticale stand ten opzichte van het grondwaterpeil beïnvloedt het Kanaal Bocholt-Herentals de grondwaterstroming boven de Kasterlee Klei door de infiltratie van water (water in kanaal daalt) of kwel (water in kanaal stijgt) naar/van de aquifer. Deze laatste toestand (water in kanaal stijgt) komt doorgaans meteen stroomafwaarts van de kanaalsluizen en bij de Congovaart voor. Nabij de site verliest het kanaal plaatselijk water, waardoor de grondwaterpeilen en stromingssnelheden toenemen.

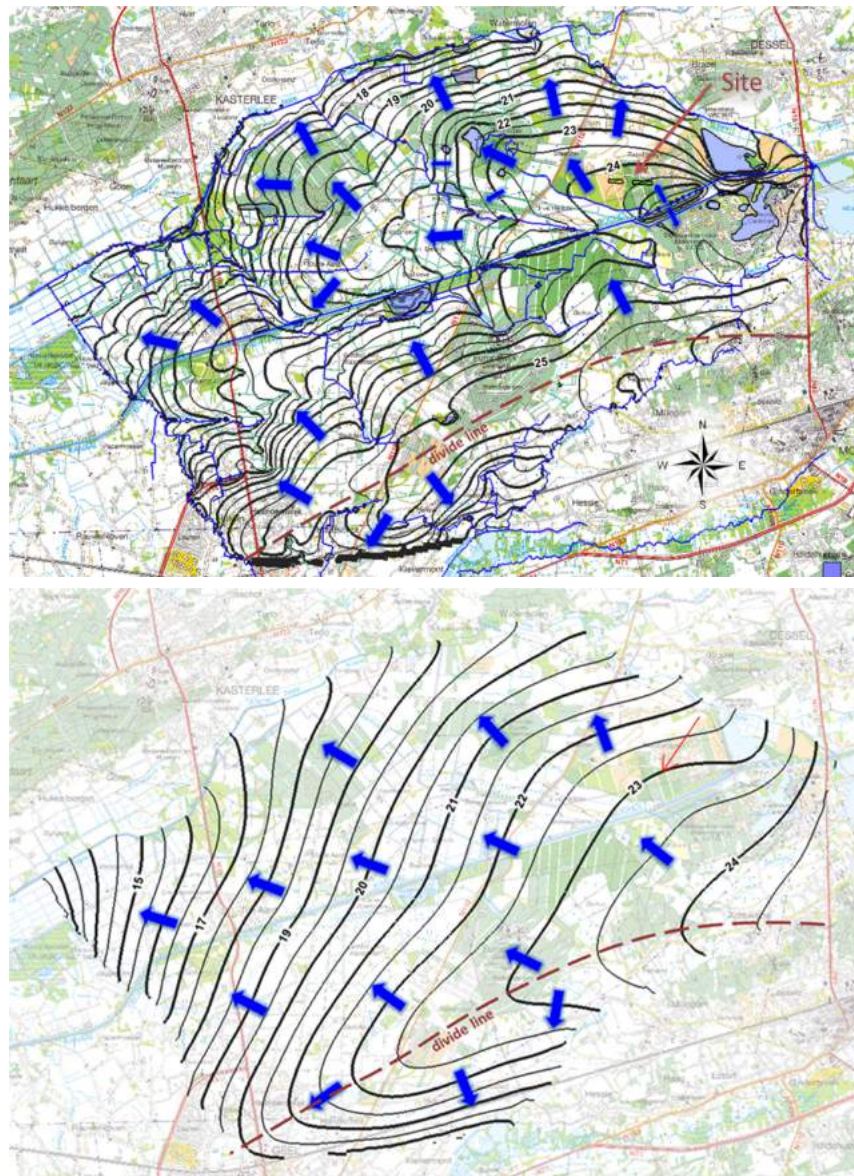
Zoals wordt getoond in Figuur 4 - 90, is de waterscheiding tussen de stroomgebieden van de Kleine/Witte Nete en de Grote Nete enkele kilometers ten zuiden van het kanaal gelegen. De bergingsite is in het infiltratiegebied van de Kleine/Witte Nete gelegen en de algemene stromingsrichtingen in de bovenste aquifer zijn er in hoofdzaak noordelijk en noordwestelijk tot westelijk georiënteerd. In de dieper gelegen delen (onder de Kasterlee Klei) stroomt het grondwater in noordwestelijke richting.

De grondwaterstroming doorheen de Kasterlee Klei in de gebieden met neerwaartse (infiltratiegebieden) en met opwaartse stroming (kwelgebieden) is weergegeven in Figuur 4 - 91. Deze laatste gebieden zijn dicht bij de

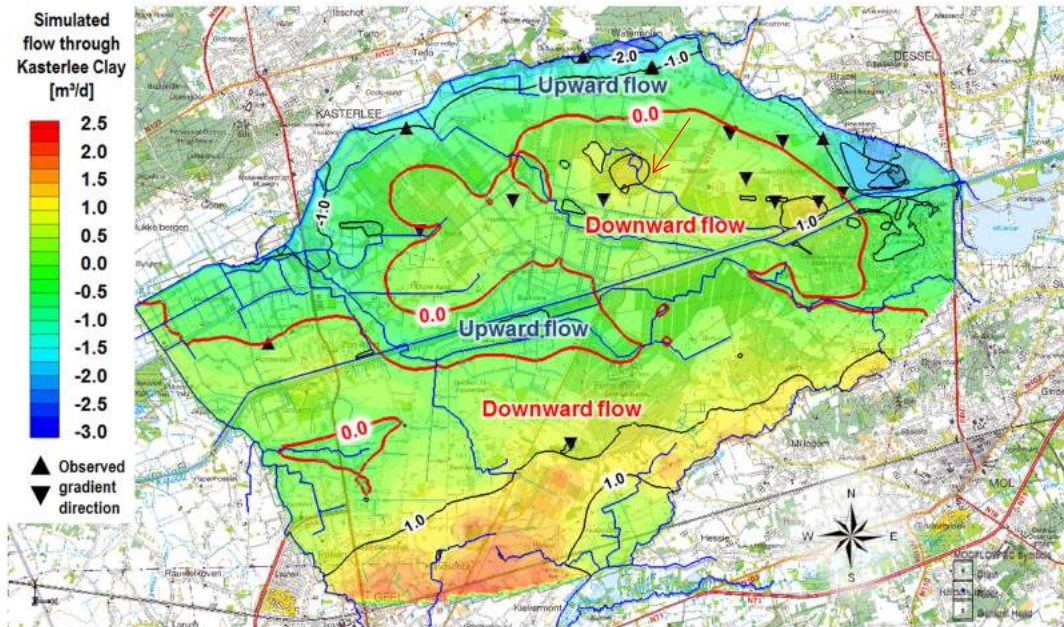
<sup>46</sup> De bemaling werd uitgevoerd van 01/08/2013 tot 06/10/2014 en van 01/12/2015 tot 31/08/2016.



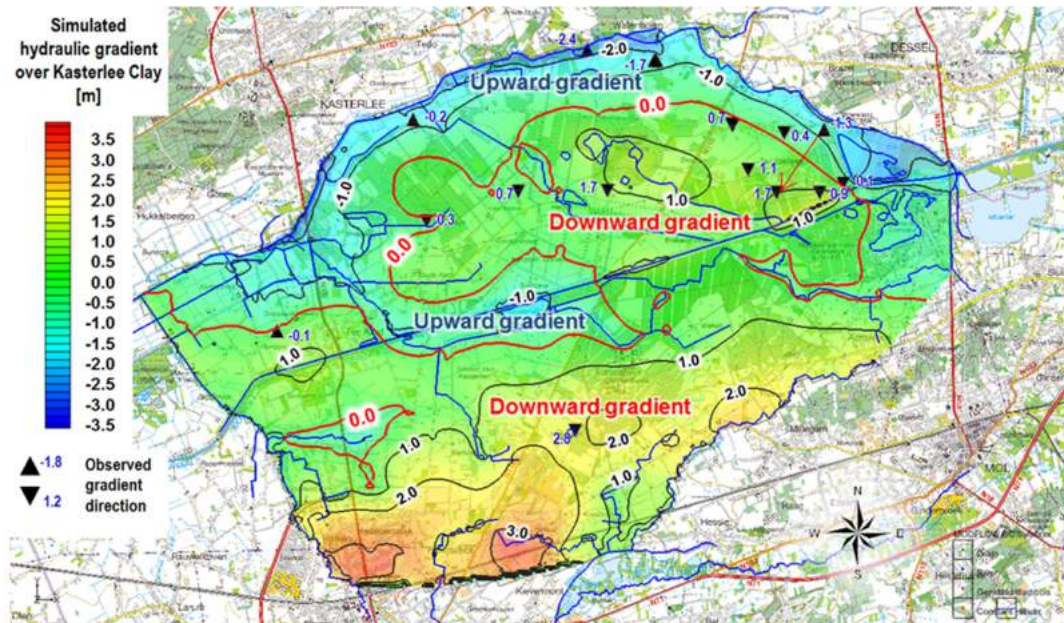
belangrijkste waterlopen gelegen (Witte Nete, Kleine Nete, Daalmansloop). De infiltratiegebieden liggen centraal en zuidelijk in het modelleringsgebied in de richting van de waterscheidingslijn (zie Figuur 4 - 90) en in het gebied tussen de grotere waterlopen, waar de plaatselijke grondwateraccumulatie aanleiding geeft tot een neerwaartse hydraulische gradiënt. Een alternatieve voorstelling van het hydraulische gedrag van de bovenste en de onderste watervoerende laag wordt geschetst in Figuur 4 - 92, waar de berekende en geobserveerde hydraulische gradiënten over de Kasterlee Klei worden vergeleken. De meeste berekende gradiënten komen goed overeen met de geobserveerde gradiënten.



**Figuur 4 - 90: Berekende grondwaterstromingsrichtingen boven (bovenste figuur) en onder (onderste figuur) de Kasterlee Klei. Locatie van de bergingsite aangeduid met de rode pijl.**



Figuur 4 - 91: Berekende verticale stroming doorheen de Kasterlee Klei. Negatieve waarden geven opwaartse stroming aan. Rode pijl geeft de locatie weer van de bergingssite.



Figuur 4 - 92: Vergelijking van berekende en geobserveerde hydraulische gradiënt doorheen de Kasterlee Klei. Negatieve waarden geven een opwaartse stroming aan. Rode pijl geeft de locatie weer van de bergingssite.

#### 4.6.2.7.2 Langetermijngemiddelde van de grondwaterstroomrichting ter hoogte van de bergingsite

Ter hoogte van de bergingsite werd de gemiddelde grondwaterstroming op lange termijn geschat op basis van een grote hoeveelheid data:

- Er is een uitgebreid netwerk van peilbuizen beschikbaar in de omgeving van de bergingsite en die peilbuizen worden maandelijks opgemeten (Figuur 4 - 93);
- Er werden in 2015-2016 bijkomende peilbuizen geplaatst in de omgeving van de bergingsite om de grondwatertafel in de omgeving ervan beter in kaart te kunnen brengen;
- Er werden nieuwe topografische metingen uitgevoerd om één consistente dataset van coördinaten te verkrijgen;
- Er werd een methode uitgewerkt om de maandelijkse metingen te interpoleren in de tijd, enerzijds om een beter zicht te krijgen op de dynamiek van de grondwatertafel, anderzijds om de geometrie op specifieke dagen te kunnen inschatten (bijvoorbeeld op de data van terreincampagnes, om andere types van metingen aan de geometrie van de grondwatertafel te kunnen relateren);
- De nieuwe data en uitgewerkte methode werden gebruikt om de gemiddelde situatie voor de periode 2001-2016 in te schatten, om zo het langetermijngemiddelde beter te benaderen.

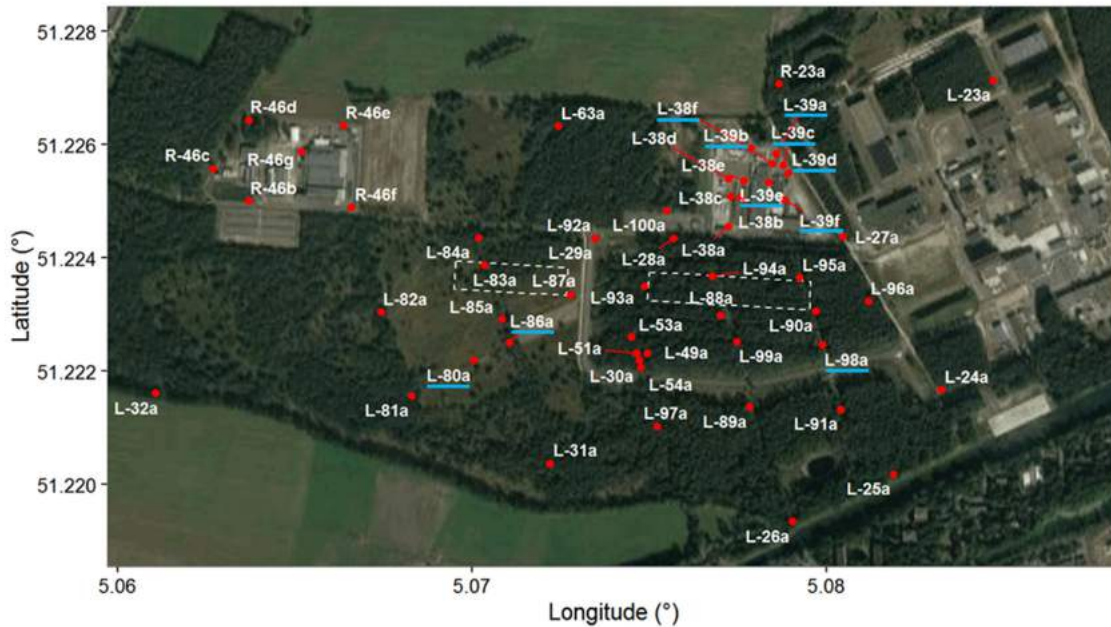
Deze analyse steunt op de aanname dat de stromingsrichting op basis van de grondwatertafel voldoende representatief is voor de grondwaterstroming over de volledige diepte van de bovenste aquifer, maar vooral voor de eerste 15 m (Quartair & Boven-Mol), die de belangrijkste zone is in het kader van de berekening van potentiële radionuclideconcentraties (zie Figuur 4 - 78, en ook Figuur 4 - 132 in §4.6.2.8). Deze aanname is gejustificeerd omwille van de grote hydraulische geleidbaarheden binnen deze zone en de beperkte verticale gradiënten voor de volledige bovenste aquifer.

#### Data 2015-2016

##### 1. Installatie nieuwe peilbuizen

In september 2015 werden er 13 peilbuizen (L-80a tot en met L-92a in Figuur 4 - 93) bijgeplaatst in de omgeving van de toekomstige bergingsinstallatie, met als doel de ruimtelijke patronen en de dynamiek van de grondwatertafel, alsook de daarmee gepaard gaande stromingsrichtingen, met een grotere mate van detail in kaart te brengen ([R4-147], [R4-148] & [R4-149]). Deze grotere mate van detail laat toe om het langetermijngemiddelde van de stromingsrichting beter in te schatten. Vervolgens werden in januari 2016 nog 6 extra peilbuizen (L-93a tot en met L-98a in Figuur 4 - 93) bijgeplaatst op de locaties voorgesteld in [R4-150]. Alle locaties, beschikbaar eind 2016, waar de positie van de watertafel werd opgemeten, zijn weergegeven in Figuur 4 - 93 [R4-151].

De positie van de grondwatertafel werd in al deze peilbuizen na hun installatie minstens één keer per maand opgemeten. Voor een groot aantal peilbuizen zijn er extra metingen beschikbaar, die uitgevoerd werden tijdens de verschillende terreincampagnes (zie §4.6.2.7.4). De initiële coördinaten en referentiehoogtes van de peilbuizen werden bepaald met behulp van satellietbeelden, smartphone GPS metingen, en een niveau voor het overzetten van de hoogtes vanaf eerder ingemeten peilputten [R4-147].



**Figuur 4 - 93: Alle beschikbare locaties (eind 2016) waar de positie van de watertafel opgemeten wordt in de omgeving van de bergingssite. De coördinaten van de blauw onderstreepte peilputten werden aangepast na de topografische meetcampagne 2017.**

## 2. Nieuwe topografische metingen (2017)

Tijdens het verwerken van de data tot kaarten met de positie van de watertafel werd het duidelijk dat er verschillende inconsistenties waren tussen verschillende peilputten van verschillende terreincampagnes. Om de grootste onzekerheden met betrekking tot de coördinaten, maar vooral tot de referentiehoogtes, weg te nemen werd begin 2017 besloten om alle peilputten opnieuw te laten inmeten door eenzelfde landmeter. Verschillende metingen hiervan werden ook een tweede maal herhaald, om een idee te krijgen over de meetfouten en de eerdere resultaten te bevestigen of te ontcrachten.

Er werd besloten om de referentiehoogtes van 10 peilputten aan te passen (zie blauw onderstreepte peilputten in Figuur 4 - 94), alsook de x- en y-coördinaten van alle nieuwe (sinds 2015 geplaatste) peilputten. Deze aanpassingen werden gedocumenteerd in [R4-152].

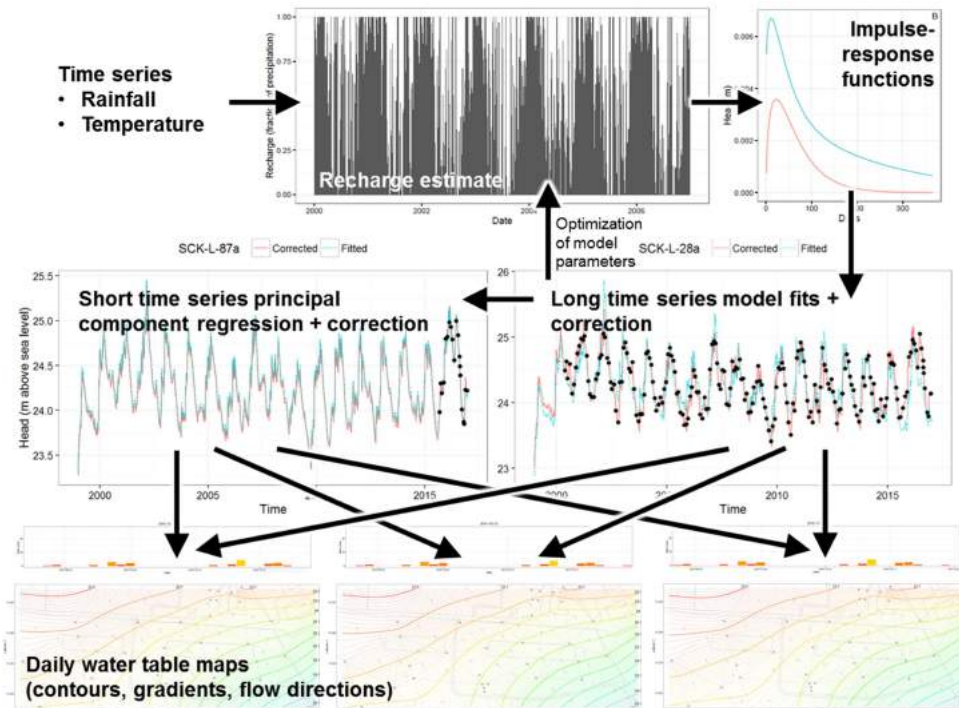
## Dataverwerking

Omwille van de grote variaties van de positie van de grondwatertafel in de tijd, en de beperkte meetfrequentie, werd besloten om de tijdreeksen te interpoleren in de tijd. Dit laat toe om de positie van de grondwatertafel in een specifieke peilput op eender welke datum te schatten. Hierbij kunnen we de evolutie van de positie van de grondwatertafel in de tijd nauwkeurig weergeven, alsook uitmiddelen over langere periodes om de

representativiteit van de resultaten te verhogen. Om bij deze interpolatie ook rekening te houden met de hoeveelheid neerslag en de seizoenen, werd gebruik gemaakt van het RRAWFLOW model [R4-153]. Dit is een impuls-respons model waarbij een neerslag- en temperatuurtijdreeks eerst omgezet worden naar een schatting van de infiltratie (met behulp van vergelijkingen van Jakeman en Hornberger [R4-154]), waarna de convolutie van deze infiltratie met impuls-respons functies doorgerekend wordt. Het resultaat hiervan is een tijdreeks van dagelijkse waarden van de positie van de grondwater tafel in een specifieke peilput. De parameters van dit model werden voor elke peilput geoptimaliseerd met het algoritme van Byrd *et al.* [R4-155], en de finaal gefitte waarden werden gecorrigeerd door lineaire interpolatie, zodat de meetwaarden exact gefit werden.

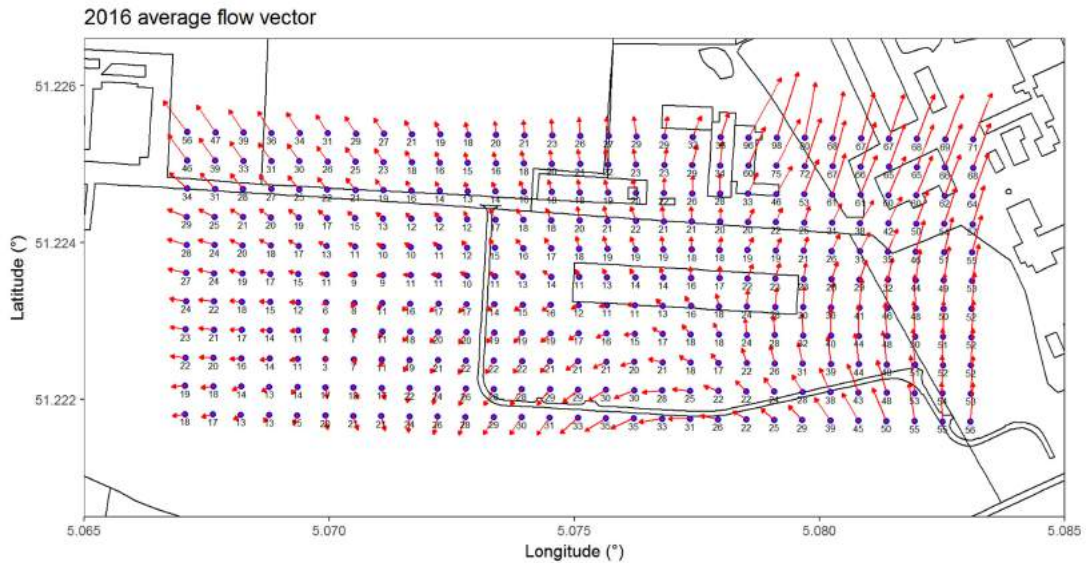
Voor de tijdreeksen van de nieuwe peilputten waren er echter nog niet genoeg data beschikbaar voor het volgen van deze methode. Vermits de grondwaterpeilen in de peilputten in de omgeving van de installatie sterk met elkaar gecorreleerd zijn in de tijd, werd besloten om deze korte tijdreeksen te modelleren in functie van de RRAWFLOW resultaten voor de overige peilputten. Dit werd gedaan met behulp van principaalcomponenten regressie, waarbij enkel de drie meest belangrijke componenten gebruikt werden. Ook hier werden de finaal gefitte waarden gecorrigeerd door middel van lineaire interpolatie, zodat de meetwaarden exact gefit werden. Op deze manier werd voor alle peilputten een schatting van de positie van de grondwater tafel voor eender welke datum verkregen, en kunnen er dagelijkse grondwater tafelkaarten gemaakt worden die aan deze data gelinkt zijn. In eerste instantie werd deze methode toegepast op de data van 2016. Een overzicht van de berekeningsmethode is weergegeven in Figuur 4 - 94. Ze werd voor het eerst voorgesteld in [R4-156], en later verder uitgewerkt inclusief de correcties op basis van de topografische metingen in [R4-151]. De gebruikte neerslag- en temperatuurgegevens zijn afkomstig van de weerstations in Retie [R4-157] en Eersel [R4-158].

Een samenvatting van het resultaat van de dagelijkse kaarten voor 2016 is weergegeven in Figuur 4 - 95 met behulp van de som van de stromingsvectoren. Hieruit blijkt duidelijk dat de meest dominante stromingsrichtingen ter hoogte van de locatie voor de oostelijke tumulus gaan van NW tot N. In de zuidwestelijke hoek van de tumulus is er echter een zone met dominerende westwaartse stroming, met een kleine zuidwaartse component. Indien we deze resultaten vergelijken met de stromingsvectoren die we bekomen op basis van de watertafel en de hydraulische geleidbaarheid uit de modelsimulatie (Figuur 4 - 96), dan lijkt het dat de stromingsrichtingen in deze zuidwestelijke hoek verkeerd worden ingeschat in het model. In de volgende sectie tonen we echter aan dat dit niet het geval is. De reden voor deze discrepantie is de atypische hydrologische situatie in het jaar 2016, die maakt dat deze toestand niet representatief is voor de gemiddelde situatie op lange termijn.

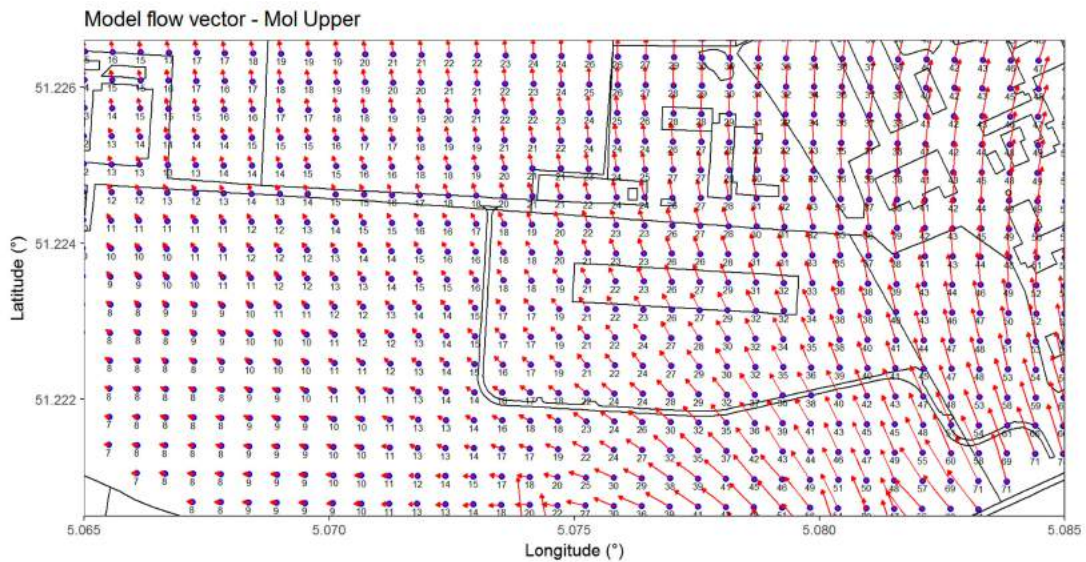


Figuur 4 - 94: Overzicht van de werkwijze om de gemeten stijghoogtes om te zetten naar tijdreeksen met dagelijkse waarden voor de positie van de grondwater tafel, en uiteindelijk dagelijkse kaarten.

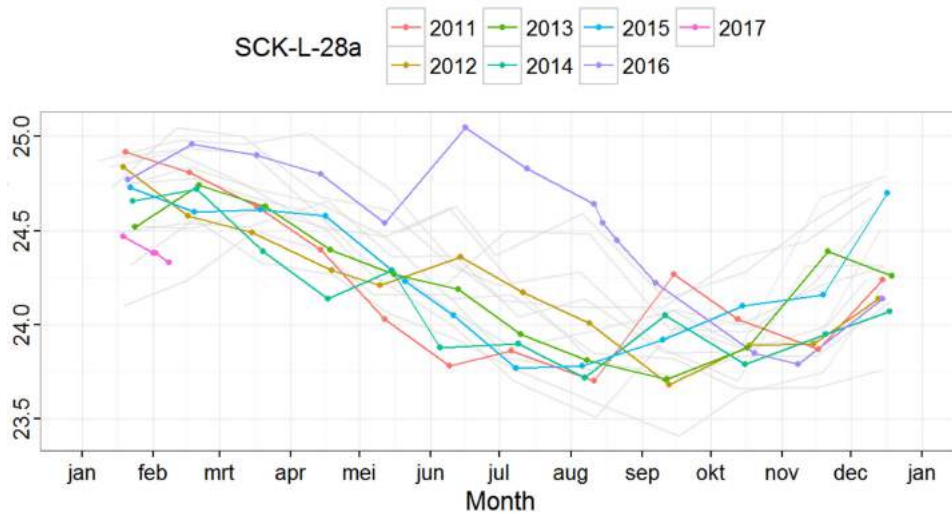
Ter illustratie van deze extreme situatie geeft Figuur 4 - 97 een overzicht van de jaarlijkse fluctuaties in peilput SCK-L-28a. Verder geeft Figuur 4 - 98 nog een overzicht van de maandelijkse neerslag geregistreerd in het weerstation te Eersel, waaruit duidelijk blijkt dat de neerslag in juni 2016 ver boven het gemiddelde lag. Gedetailleerde analyse van dagelijkse tijdsreeksen van stroomrichtingen toont aan dat er tijdens de maanden met een hoge grondwaterstand (wintermaanden en vroege lentemaanden) een kleine W – SW component is in de zuidwestelijke hoek, terwijl er een sterke NW component is bij lage grondwaterstand. In 2016 kwam er door de grote neerslag tijdens het voorjaar, maar vooral in juni, een tweede periode van extreem hoge grondwaterstand voor, waardoor een veel langere periode gekenmerkt wordt door een W – SW component in de zuidwestelijke hoek dan gedurende andere jaren. Dit uit zich voor de gemiddelde situatie in 2016 in stromingsrichtingen in de zuidwestelijke hoek van de installatie die niet overeenstemmen met de stromingsrichtingen uit het model. Bijkomend zijn ook alle stroomsnelheden ter hoogte van de installatie hierdoor systematisch kleiner dan gedurende andere jaren.



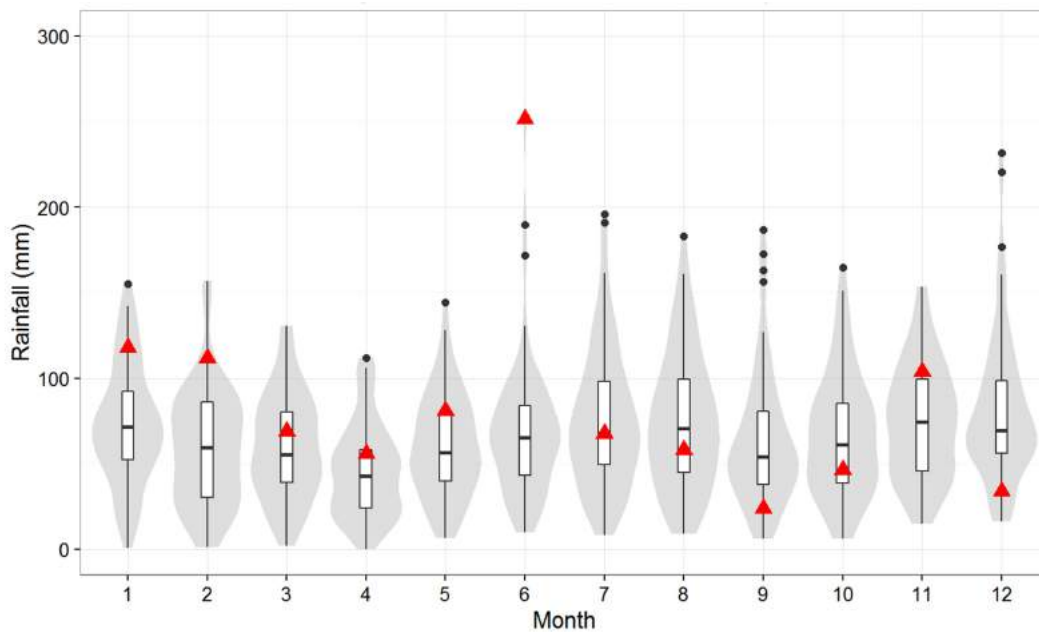
Figuur 4 - 95: Overzicht van de som van de dagelijkse stromingsvectoren voor het jaar 2016. De richting en grootte van elke vector zijn weergegeven. De grootte is uitgedrukt in meter per jaar, en werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van ~17 m/d (zie §4.6.2.6.3 “Resultaten van de automatische kalibratie” voor een verklaring voor deze waarde).



Figuur 4 - 96: Overzicht van de stromingsvectoren gesimuleerd door het lokaal grondwatermodel. De richting en grootte van elke vector zijn weergegeven. De grootte is uitgedrukt in meter per jaar, en werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van 8,3 m/d, die in het model gebruikt wordt voor de bovenste hydrogeologische laag (Quartair & Boven-Mol).



Figuur 4 - 97: Overzicht van de grondwaterpeilen (m TAW) in peilput SCK-L-28a, die op de site gelegen is, ter illustratie van de uitzonderlijke hydrologische situatie in 2016. Data van de laatste 7 jaren zijn in een kleurencode weergegeven.

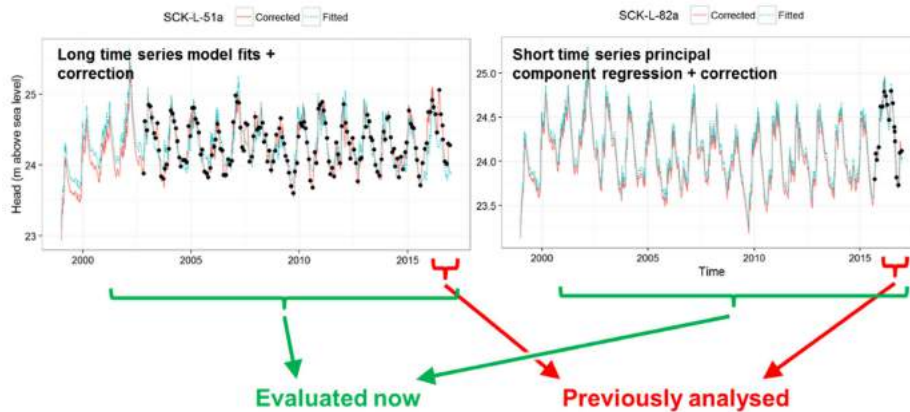


Figuur 4 - 98: Overzicht van de maandelijkse neerslag geregistreerd in het KNMI weerstation te Eersel (gelegen op ~23 km van de site) voor 2016 (rode driehoeken) alsook voor de volledige tijdreeks sinds 1951 (viool- en boxplots). De boxplots geven de uitschieters weer (meer dan 1,5 keer de interkwartielafstand verwijderd van het 1<sup>ste</sup> of 3<sup>de</sup> kwartiel), de kleinste en grootste niet-uitschieters, en het 1<sup>ste</sup>, 2<sup>de</sup> en 3<sup>de</sup> kwartiel.



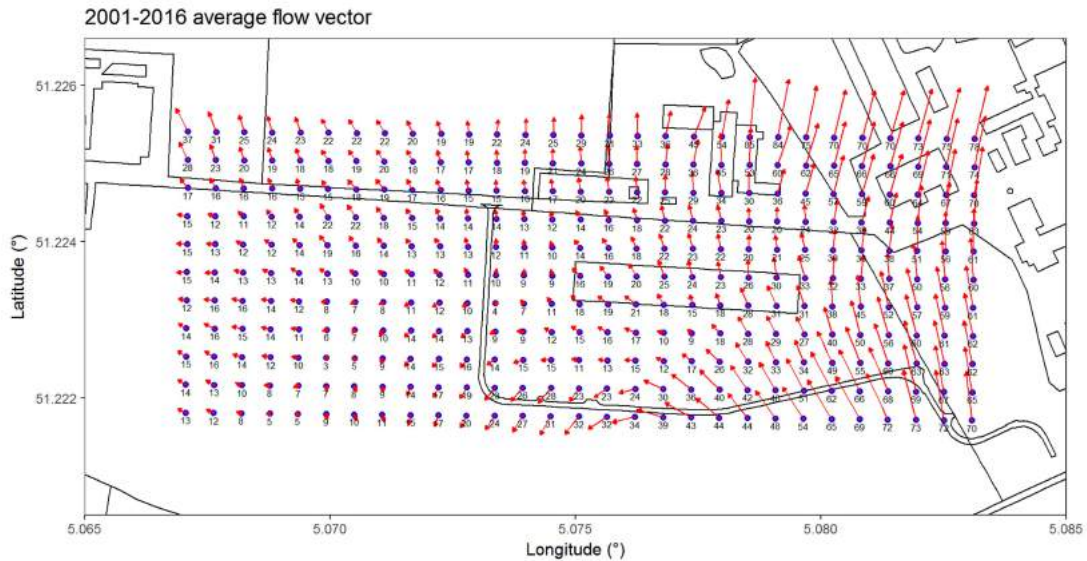
### Extrapolatie naar de periode 2001-2016

Vermits één enkel jaar niet representatief kan zijn voor de gemiddelde situatie op lange termijn, en omwille van de duidelijke problemen met het atypische jaar 2016, werd gekozen om de gevolgde methodiek toe te passen op de periode 2001-2016. Hierbij werd niet enkel geïnterpoleerd in de tijd, maar ook geëxtrapoleerd naar de periode vóór de installatie van de individuele peilputten. Dit wil zeggen dat de schattingen daar minder nauwkeurig zijn, vermits de gesimuleerde tijdreeksen niet kunnen worden gecorrigeerd met meetwaarden. Dit blijft momenteel echter de enige manier om puur op basis van meetwaarden (*i.e.* zonder expliciete grondwaterstromingsmodellering) gedetailleerde informatie te verkrijgen over het gedrag van de grondwatertafel op langere termijn. Deze werkwijze wordt geïllustreerd in Figuur 4 - 99.



**Figuur 4 - 99: Illustratie van de uitbreiding van de interpolatie voor 2016 naar de extrapolatie voor de periode 2001-2016. Merk wel op dat de schattingen vóór 2001 nog beïnvloed worden door de initialisatie van de convolutie in het RRAWFLOW model, waardoor de grondwaterpeilen nog systematisch onderschat worden.**

De resultaten voor de volledige periode 2001-2016 zijn samengevat in Figuur 4 - 100 door opnieuw de som van alle vectoren weer te geven, maar deze keer gedeeld door het aantal beschouwde jaren. Deze resultaten kunnen opnieuw rechtstreeks vergeleken worden met deze op basis van de modelsimulatie in Figuur 4 - 96. Uit deze vergelijking blijkt dat de gemiddelde stromingsrichtingen ter hoogte van de oostelijke tumulus (NW - N) vrij goed overeenstemmen met deze uit de modelsimulatie (NW - NNW). De afwijkingen in de zuidwestelijke hoek van de tumulus die in Figuur 4 - 95 te zien zijn voor het jaar 2016, worden inderdaad uitgemiddeld als we deze langere periode beschouwen.



**Figuur 4 - 100: Overzicht van de som van de dagelijkse stromingsvectoren voor de periode 2001-2016. De richting en grootte van elke vector zijn weergegeven. De grootte is uitgedrukt in meter per jaar, en werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van ~17 m/d (zie §4.6.2.6.3 “Resultaten van de automatische kalibratie” voor een verklaring voor deze waarde).**

### Conclusie

Sinds september 2015 werden verschillende stappen ondernomen om de dynamiek van de grondwater tafel in de omgeving van de installatie met een grotere mate van detail op te volgen. Na het verwerken van de nieuwe data werd het duidelijk dat er voor 2016 reeds een vrij goede overeenstemming was tussen de stromingsrichtingen afgeleid op basis van de data en deze gesimuleerd door het lokaal grondwatermodel. Omwille van de atypische meteorologische situatie van 2016 leken er echter discrepanties te bestaan tussen het model en de verzamelde data. Indien echter de gemiddelde stroming voor de volledige periode 2001-2016 geschat wordt, blijkt dat deze discrepanties verdwijnen, en kunnen we stellen dat de stromingsrichtingen gesimuleerd door het model ter hoogte van de oostelijke tumulus wel degelijk bevestigd worden door de verzamelde data.

Stijghoogtemetingen zullen op maandelijkse basis blijvend worden opgemeten tot het einde van de nucleaire reglementaire controlefase (zie ook §16.4.11.2).

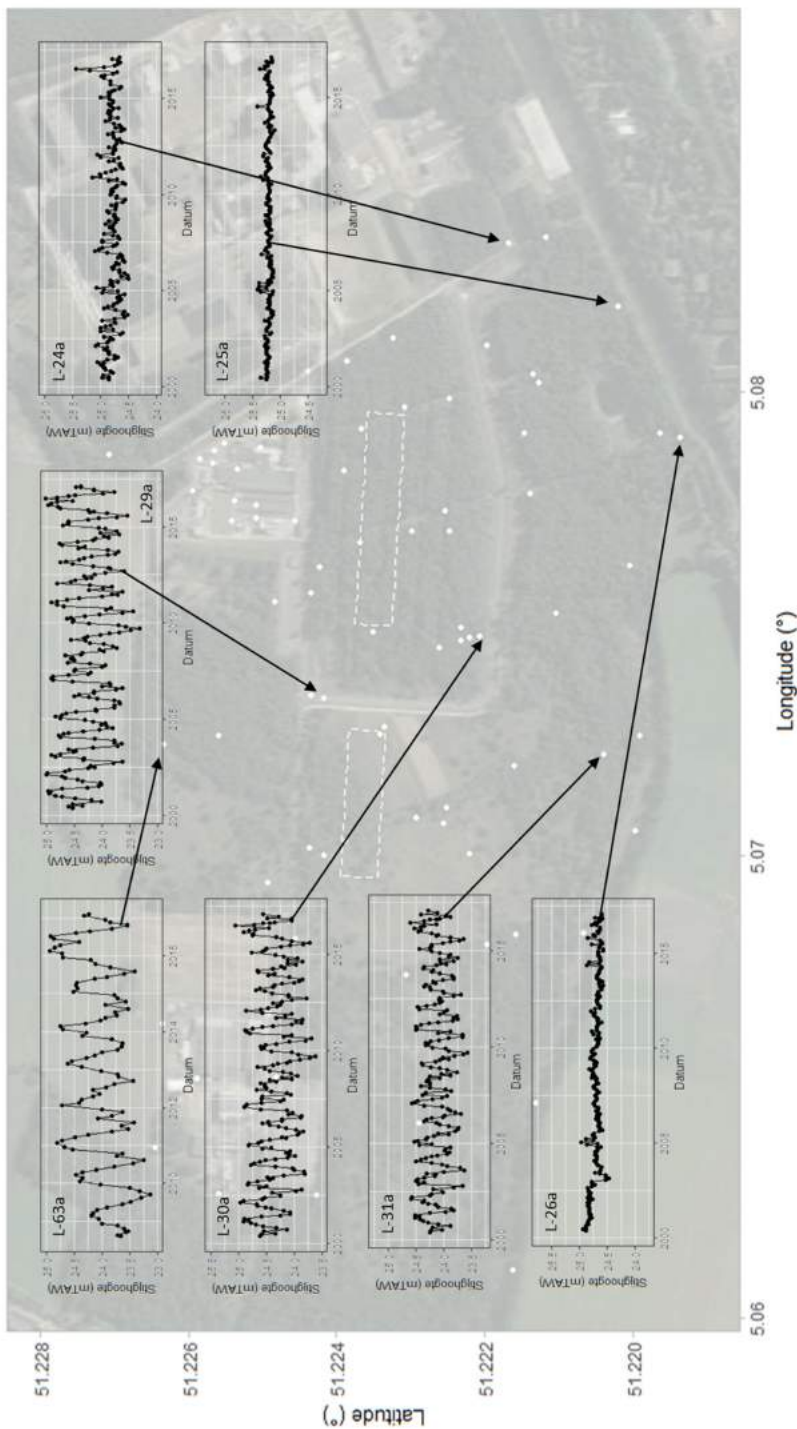
### 4.6.2.7.3 Seizoensfluctuaties van de grondwaterstanden

Het grondwaterpeil fluctueert op het ritme van de seizoenen als gevolg van variaties van infiltratie in de tijd. Naast infiltratie beïnvloeden nog andere factoren de seizoenale fluctuaties van het grondwaterpeil, zij het met een geringer effect. Deze factoren zijn onder meer de waterpeilen in rivieren, beken, meren en kanalen. Het verschil in de grootte van de grondwaterfluctuaties is afhankelijk van de afstand tot een oppervlaktewaterlichaam (bijvoorbeeld een kanaal) en de fluctuatie van het peil in dat oppervlaktewaterlichaam (praktisch constant in het geval van het kanaal). Dit is geïllustreerd in Figuur 4 - 101. De piëzometrische niveaus fluctueren met een

grootteorde van ongeveer 1 meter ter hoogte van de bergingsite. Meer naar het noorden toe, en dus nog verder van het kanaal, wordt dit al snel 1,5 meter. Naar het zuiden toe, richting het kanaal, wordt de amplitude systematisch kleiner, en vlak naast het kanaal blijven er slechts enkele tientallen centimeter over.

De veranderingen in het ruimtelijk patroon van de grondwaterstroming die gepaard gaan met deze fluctuaties van het grondwaterpeil, zijn weergegeven in Figuur 4 - 102. De twee uiterste situaties, deze van maart en oktober, zijn weergegeven. Door de hogere infiltratie en peilen in/na de winter is de grondwatertafel veel vlakker, zijn de stroomsnelheden kleiner, en is er ook duidelijk een stroming terug richting kanaal (het gedeelte ten westen van de sluis) ten zuid-westen van de site. Door de lagere infiltratie en peilen in/na de zomer is er systematisch een grotere gradiënt op de site, met stromingsrichting NW tot N. Ook de stroming in de richting van het kanaal is hier veel minder sterk aanwezig.

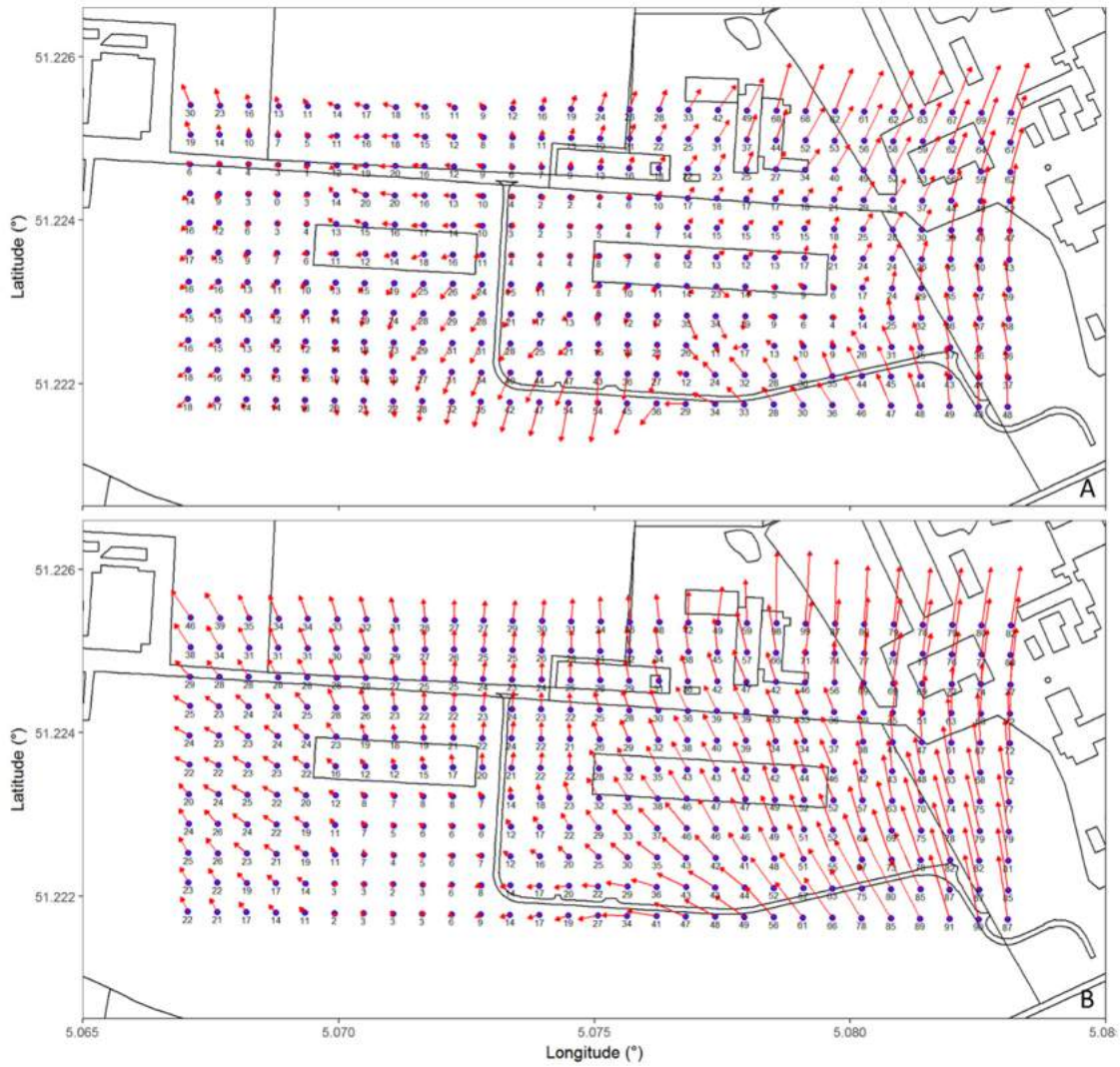
De grootte van de seizoensvariaties op grotere schaal is weergegeven in Figuur 4 - 103 op basis van het transiënt grondwaterstromingsmodel. Zoals eerder werd aangehaald, worden de grootste verschillen tussen het gemiddelde winterpeil en het gemiddelde zomerpeil gesimuleerd in het gebied ten noorden van de bergingsite, waar het effect van de oppervlaktewaterlichamen beperkt is. Het maximumverschil is ongeveer 75 cm in het model. Het verschil bij de oppervlaktewaterlichamen is nihil vermits de rivier-, afvoer-, kanaal- en meerpeilen in het transiënt simulatiemodel als constant worden beschouwd. Op basis van ongeveer 20 jaar maandelijkse stijghoogtemetingen op de site bedraagt de gemiddelde diepte van het grondwater ten opzichte van het maaiveld in de zomer (april-september) 1,56 m, en in de winter (oktober-maart) 1,38m (zie §7.6 van [OD-051]).



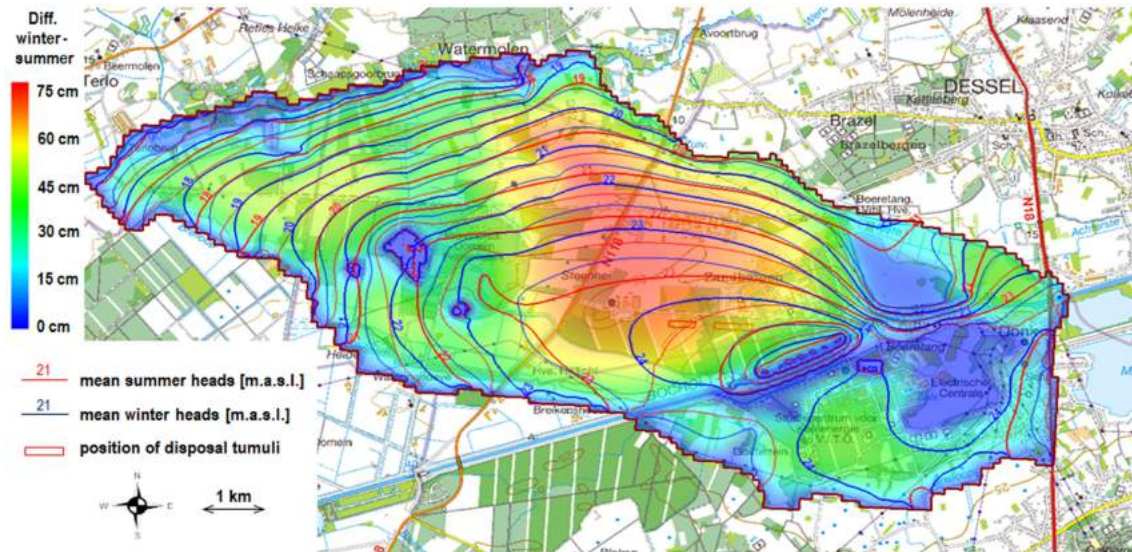
Figuur 4 - 101: De piëzometrische resultaten (stijghoogte in m TAW) voor zeven waarnemingspunten gedurende de waarnemingsperiode van 2000 tot 2009 op verschillende afstanden van het kanaal (oppervlaktewaterelement) geven verschillen aan in amplitude.

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel



Figuur 4 - 102: Gemiddelde grondwaterstroming voor maart (A) en oktober (B), voor de hele periode 2001-2016. Deze resultaten werden op dezelfde manier bekomen als deze voor Figuur 4 - 100.



Figuur 4 - 103: Het verschil tussen het gemiddelde grondwaterpeil (in cm) in de winter en het gemiddelde grondwaterpeil in de zomer in de buurt van de site (berekend met het transiënte model).

#### 4.6.2.7.4 Stroomsnelheden ter hoogte van de bergingsite

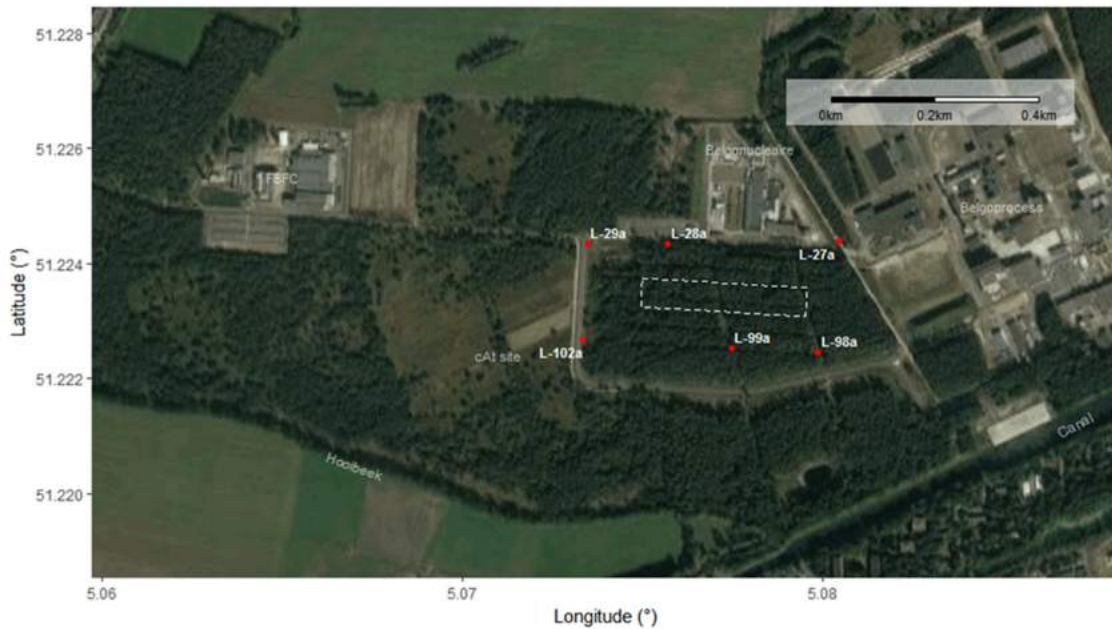
De stroomsnelheid op en rond de bergingsite werd in de hieronder beschreven stappen opgemeten en dient ter ondersteuning van de resultaten bekomen met het Lokaal grondwatermodel.

- Er werden seizoenale dilutietestcampagnes georganiseerd (vanaf 2016) om op zes locaties het specifiek grondwaterdebiet te kwantificeren. Na problemen met de peilputten op één van de locaties werd deze vervangen door een nieuwe peilput ten westen ervan, waarvan hier ook de eerste meting besproken wordt (lente 2017);
- De ruimtelijke verdeling van de hydraulische gradiënt en de *in situ* metingen van de hydraulische geleidbaarheid (zie §4.6.2.6.2) werden gebruikt om de ruimtelijke verdeling van stroomsnelheden te schatten. De consistentie tussen deze aanpak, de dilutietesten en de modelresultaten wordt aangetoond;
- Het effect van de schattingen van stroomsnelheden, op de zes locaties van de dilutietesten, op een proxy voor de lokale geotransferfactor wordt geïllustreerd.

#### Dilutietesten op individuele peilputten

##### 1. Een overzicht van de resultaten

Ter bevestiging van de stroomsnelheid werd in eerste instantie getracht om het specifiek grondwaterdebiet (ook wel de Darcy flux genoemd) te meten in verschillende peilputten, alsook in enkele speciaal hiervoor geplaatste putten. De methode die hiervoor gebruikt werd, is de *point dilution method* [R4-159], [R4-160], waarvan de theorie uitvoerig beschreven werd in [R4-161], en opnieuw samengevat in [R4-148]. De locaties waar deze dilutietesten plaatsvonden, zijn weergegeven in Figuur 4 - 104.

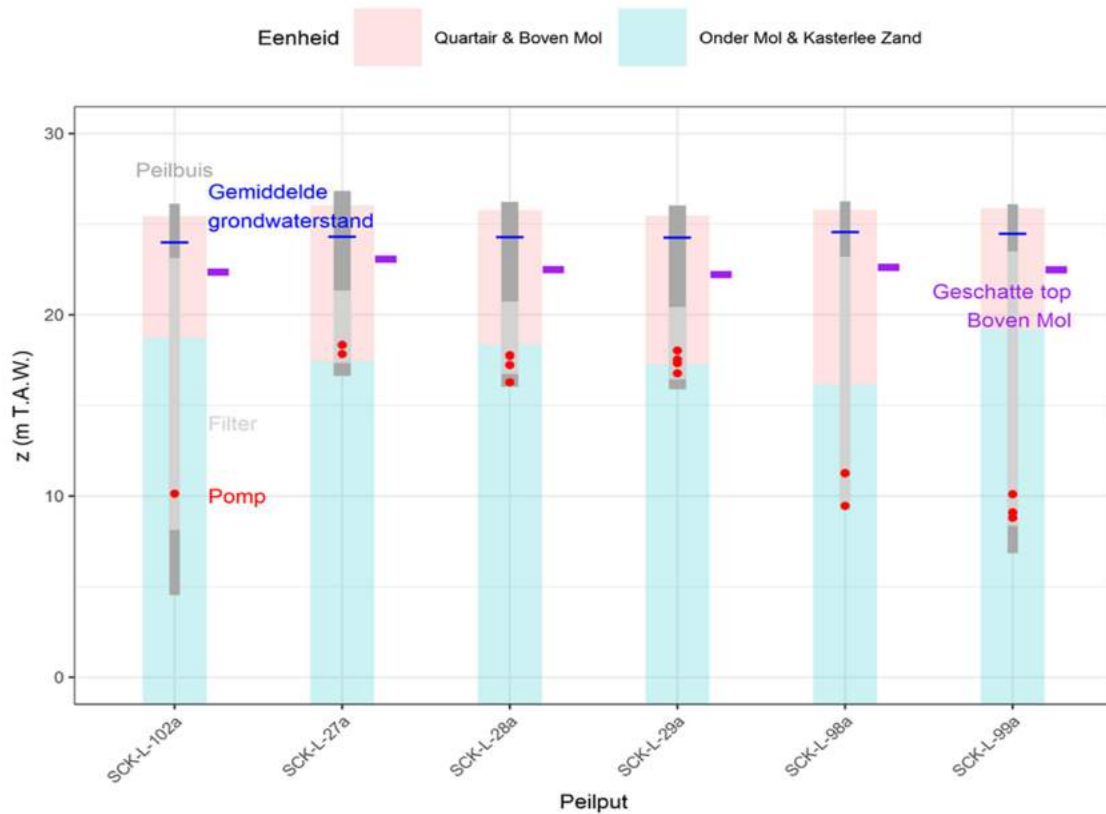


**Figuur 4 - 104: Overzicht van de locaties waar dilutietesten werden uitgevoerd, alsook de locatie van de toekomstige oostelijke tumulus<sup>47</sup>.**

Bij een dilutietest wordt een bepaalde hoeveelheid tracer toegevoegd aan een peilput, en terwijl de concentratie van deze tracer in de put continu gehomogeniseerd wordt (door bijvoorbeeld het water rond te pompen), wordt de evolutie van de concentratie opgevolgd. Door de natuurlijke grondwaterstroming doorheen de filter wordt een deel van de tracer afgevoerd. De snelheid waarmee de afname van de concentratie van de tracer in de put plaatsvindt, is dus een maat voor het specifieke grondwaterdebiet. Er dient hierbij wel een correctie te gebeuren op basis van de vervorming van het stromingsveld door de aanwezigheid van de put. Figuur 4 - 105 geeft een overzicht van de architectuur van de verschillende geteste putten. Dit overzicht toont duidelijk dat SCK-L-98a, SCK-L-99a en SCK-L-102a met hun filter van 15 m een groter deel van de aquifer beslaan dan de overige peilputten. Dit komt overeen met de zone van de aquifer die van belang is voor de berekening van potentiële radionuclideconcentraties (zie Figuur 4 - 79). De resultaten die worden bekomen voor deze recent geplaatste peilputten zijn dan ook meer representatief in het kader van de bevestiging van de stroomsnelheid. Figuur 4 - 105 geeft verder ook nog de grensovergang tussen de Quartair & Boven-Mol eenheid en de Onder-Mol & Kasterlee Zand eenheid weer. Gebaseerd op de ON-Dessel-2 en ON-Dessel-5 boringen wordt de diepte van het Quartair op de site geschat op ongeveer 3 meter diepte onder het maaiveld. Het grof Boven-Mol facies, dat duidelijk aanwezig is ter hoogte van de bergingsite, beïnvloedt hier duidelijk de grondwaterstroming doorheen de verschillende filters, en dat voor de ondiepe filters in een grotere mate dan voor de 15 m lange filters, omdat een groter deel van de ondiepe filters in de Boven-Mol eenheid gesitueerd zijn (de ondergrens van Quartair ligt met

<sup>47</sup> Metingen voor de westelijke tumulus werden uitgesteld omdat bij de start van de seizoensale dilutietesten een grondwaterbemaling bij FBFC International het stromingspatroon daar beïnvloedde.

grote waarschijnlijkheid boven de bovengrens van de filter). Met de grotere hydraulische geleidbaarheid in deze grove laag valt het hierdoor ook te verwachten dat in de ondiepe filters een grotere stroomsnelheid gemeten wordt dan in de 15 m lange filters.



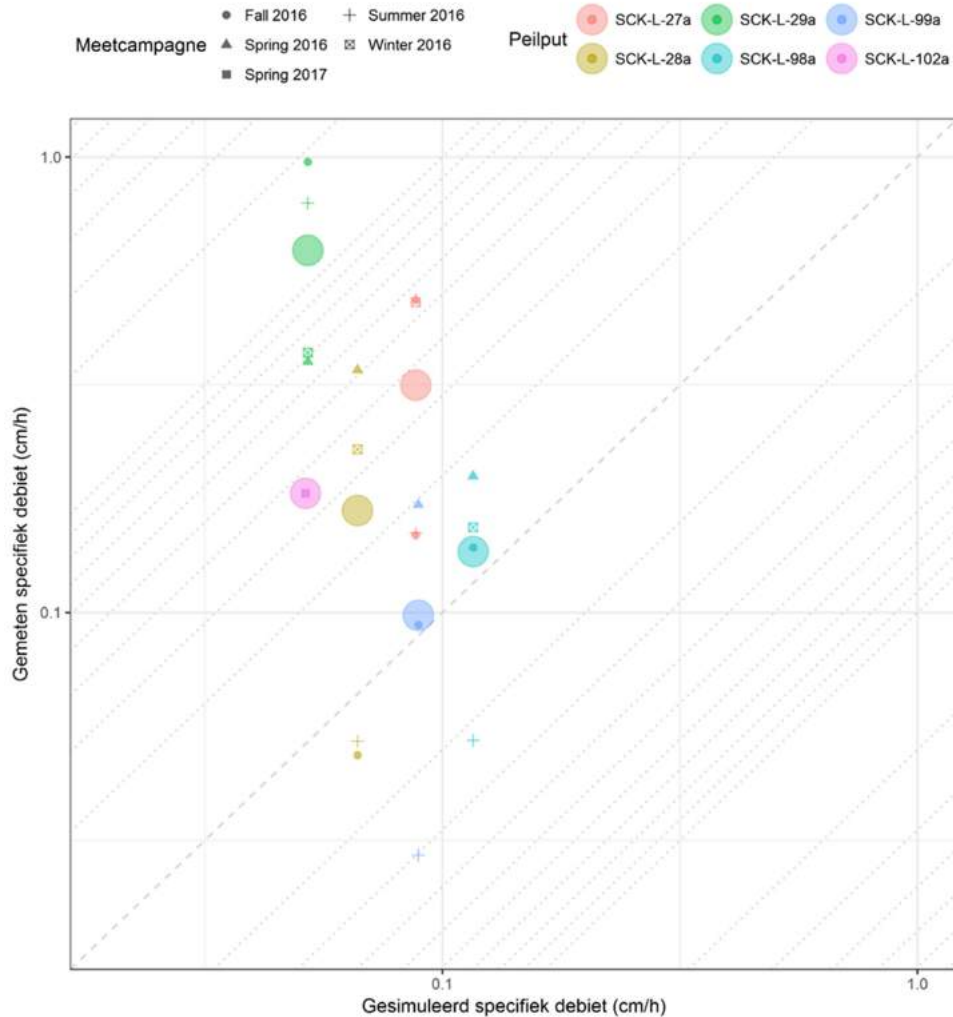
**Figuur 4 - 105: Overzicht van de verschillende putconstructies, de hydrogeologische eenheden uit het conceptueel model op basis van de geometrie in het Lokale grondwatermodel waar de eenheden Quartair en Boven-Mol samengevoegd zijn, de gemiddelde grondwaterpeilen en de diepte van de pomp tijdens de verschillende dilutietesten (in m TAW). De interne diameters van de peilbuizen zijn 7,62 cm voor SCK-L-27a, -28a en -29a, en 6,1 cm voor SCK-L-98a, -99a en -102a. Het filtergedeelte is in het lichtgrijs aangegeven.**

Er werden vier terreincampagnes uitgevoerd in 2016, één in elk seizoen. Tijdens de eerste twee campagnes werd 100 g zout opgelost in 1 L water toegevoegd aan de putten, terwijl in de laatste twee campagnes 50 g werd gebruikt. De evolutie van het zoutgehalte werd steeds opgevolgd met behulp van elektrische geleidbaarheidsloggers. De verschillende campagnes en analyses van de resultaten werden gerapporteerd in [R4-148], [R4-149], [R4-151] & [R4-156]. De SCK-L-102a put werd in april 2017 geïnstalleerd en de resultaten van de eerste meting in deze put, met 50 g zout, zijn hier ook opgenomen.

Een overzicht van alle resultaten is weergegeven in Figuur 4 - 106. Hieruit blijkt al dat de resultaten voor de eerste twee campagnes vaak systematisch hoger liggen in vergelijking met de overige resultaten, wat er op zou kunnen wijzen dat er zich teveel densiteitseffecten afspelen bij het gebruik van 100 g zout. Verder blijkt de put



SCK-L-29a steeds zeer hoge waarden te geven, waarbij men zich de vraag kan stellen of deze wel realistisch zijn. Zelfs indien we deze metingen niet zouden beschouwen, beschikken we over meer meetresultaten met een specifiek debiet dat groter is dan dat gesimuleerd door het model.



**Figuur 4 - 106: Relatie tussen de gemeten specifieke debieten (in cm/h) in de dilutietesten van 2016 en de test in SCK-L-102a van april 2017 enerzijds, en de gesimuleerde waarden uit het Lokale grondwatermodel (zie [R4-148], [R4-149], [R4-151] & [R4-156]) anderzijds. De gemiddelde waarden per peilput worden als grote cirkels weergegeven.**

De resultaten uit Figuur 4 - 106 bevestigen dat de stroomsnelheid op basis van dilutietesten ongeveer gelijk zijn aan de stroomsnelheden uit het Lokale grondwatermodel. De resultaten lijken zelfs te duiden op hogere gemeten stroomsnelheden dan wat het model aangeeft.

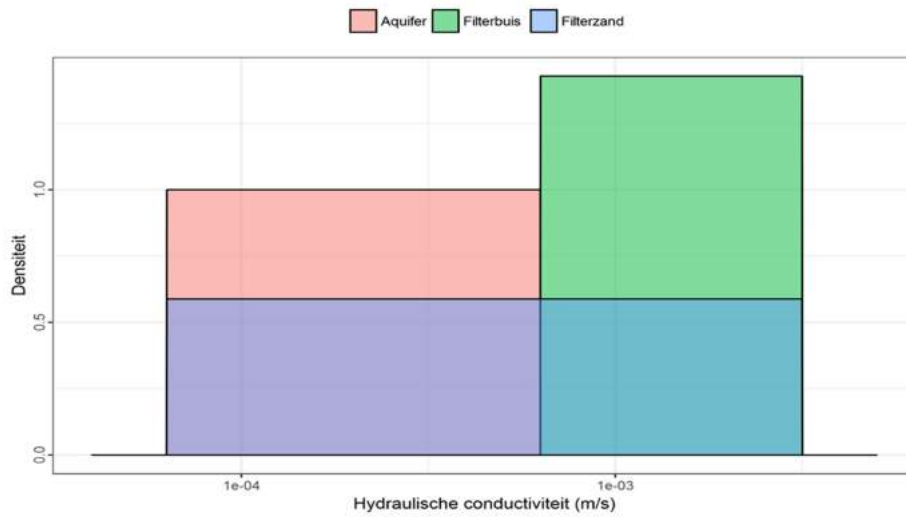
2. Het effect van de schatting van de hydraulische geleidbaarheid van de aquifer op de geschatte vervorming van het stromingsveld en het specifiek debiet

Omwille van het feit dat de aanwezigheid van een peilbuis met filter een lokale vervorming van het stromingsveld in de aquifer veroorzaakt, dient een correctie te gebeuren van de schijnbare specifieke debieten bekomen uit de dilutietesten. Om de correctiefactor in te schatten werd in [R4-148] gebruik gemaakt van de vergelijkingen van Halevy *et al.* [R4-162] en Bidaux & Tsang [R4-163]. De verdelingen van de hydraulische geleidbaarheden gebruikt in deze vergelijkingen om een verdeling van de correctiefactor te bekomen, zijn weergegeven in Figuur 4 - 107. Voor de aquifer gebruiken we hier de range 5,5 – 55 m/d, zoals afgeleid op basis van de ‘Direct Push’ data (zie ”Verder te beschouwen bereik van hydraulische geleidbaarheid op basis van metingen” in §4.6.2.6.2). Het effect op de correctiefactor wordt hier nagegaan, indien de veronderstelde hydraulische geleidbaarheid van de aquifer gevarieerd wordt. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Figuur 4 - 108. Het schijnbaar specifieke debiet wordt gedeeld door de correctiefactor om een specifiek debiet te verkrijgen. Dit resulteert in de onzekerheden weergegeven in Figuur 4 - 108 op basis van de verkregen resultaten voor de mediaan van de verdeling van de correctiefactor. Hieruit kan het volgende besloten worden:

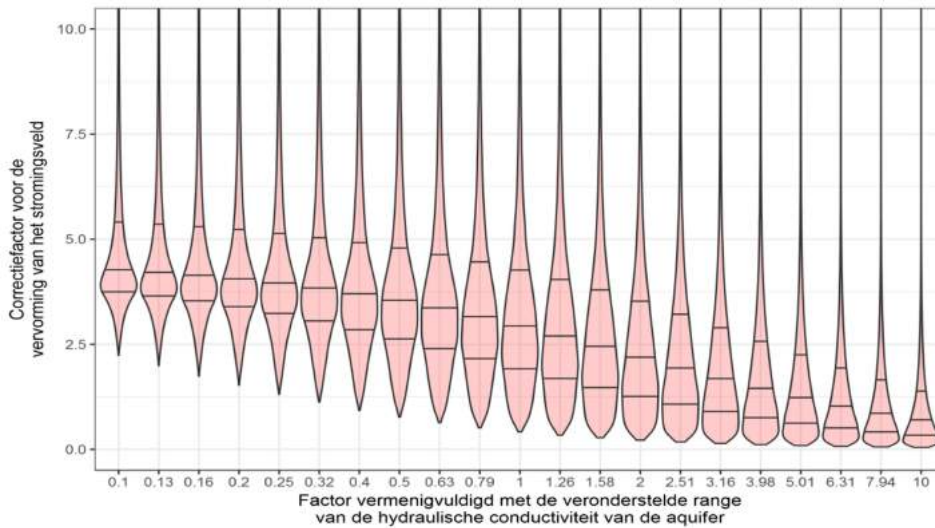
- Indien het veronderstelde bereik van hydraulische geleidbaarheden met één grootteorde verhoogd zou worden, dan zou de correctiefactor dalen tot ongeveer een vierde van zijn originele waarde. Dit wil zeggen dat het geschatte specifieke debiet dan met een factor 4 zou toenemen;
- Indien het veronderstelde range verlaagd zou worden met één grootteorde, wat volgens bepaalde metingen nog realistisch zou kunnen zijn, dan zou de correctiefactor toenemen tot ongeveer 150% van zijn originele waarde. Dit wil zeggen dat het geschatte specifieke debiet dan met een derde van zijn waarde zou afnemen.

Dit zijn de resultaten voor de vergelijking van de correctiefactor in [R4-162], voor de ondiepe peilputten. Voor deze van [R4-163] en de diepere peilputten zijn de effecten minder groot. In het kader van de berekening van potentiële radionuclideconcentraties is vooral de mogelijke daling van het geschatte specifieke debiet (grotere impact in termen van radionuclideconcentraties) van belang. Het gaat hier daarom dus over een onzekerheid kleiner dan een factor 2, indien het beschouwde bereik van de hydraulische geleidbaarheid tot een grootteorde wordt verlaagd.

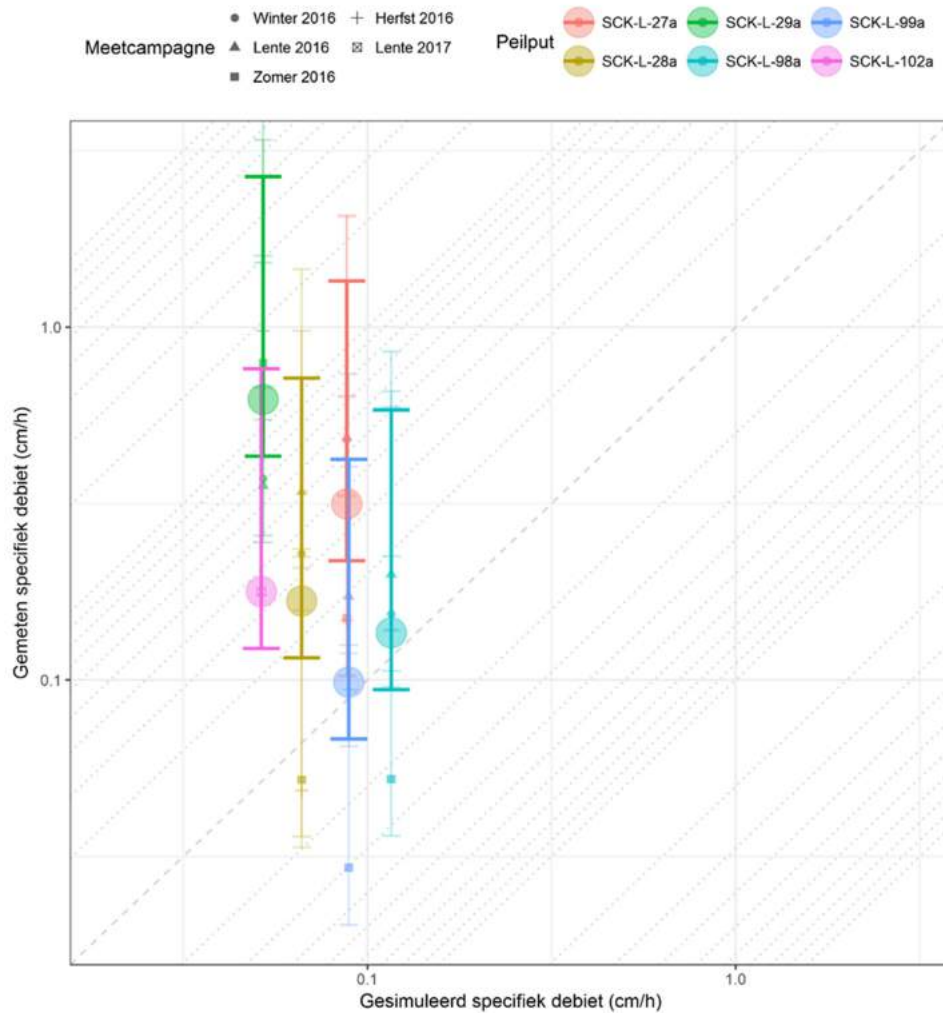
Indien dit resultaat wordt vertaald naar de data weergegeven in Figuur 4 - 106, i.e. een daling van de gemeten specifieke debieten met een derde van hun waarde, dan blijkt dat gemiddeld gezien de waarden nog steeds zeer dicht aanleunen bij de simulatie van het model (Figuur 4 - 109). Het effect van de schatting van de hydraulische geleidbaarheid van de aquifer op de geschatte vervorming van het stromingsveld en het specifiek debiet is dus beperkt en beïnvloedt de data niet in de mate dat de conclusies zouden veranderen.



**Figuur 4 - 107:** Veronderstelde uniforme verdelingen van de hydraulische geleidbaarheid voor de inschatting van de onzekerheid op de vervorming van het stromingsveld ter hoogte van de filterbus. Het gebruikte bereik voor de hydraulische geleidbaarheid bedraagt 5,5 – 55 m/d (zie "Verder te beschouwen bereik van hydraulische geleidbaarheid op basis van metingen" in §4.6.2.6.2).



**Figuur 4 - 108:** Het effect van wijzigingen in het veronderstelde bereik van de hydraulische geleidbaarheid van de aquifer, uit Figuur 4 - 107, op de geschatte vervorming van het stromingsveld. De vioolplots geven de volledige verdeling, de horizontale lijnen het 25<sup>ste</sup>, 50<sup>ste</sup> en 75<sup>ste</sup> percentiel.



**Figuur 4 - 109:** Data uit Figuur 4 - 106 met foutenmarges op basis van het effect van de wijzigingen in het veronderstelde bereik van de hydraulische geleidbaarheid van de aquifer, tot één grootteorde, afgeleid uit de relatieve veranderingen in de mediaan van de verdelingen uit Figuur 4 - 108.

**Ruimtelijke verdeling op basis van gradiënt en hydraulische geleidbaarheid**

1. Ruimtelijke verdeling van de stroomsnelheid: gebruikte werkwijze

Voor het in kaart brengen van de ruimtelijke verdeling van de stroomsnelheid is opnieuw gebruik gemaakt van de benadering uit §0 ‘dataverwerking’, en de resultaten uit §0 ‘Extrapolatie naar de periode 2001-2016’. De dagelijkse kaarten van de grondwatertafel werden eerst omgezet in een hydraulische gradiënt en stromingsrichting. Om de hydraulische gradiënt om te zetten naar een stroomsnelheid werd een effectieve porositeit van 20% verondersteld samen met een realistisch bereik voor de hydraulische geleidbaarheid die tussen 5,5 tot 55 m/d bedraagt met als meest waarschijnlijke waarde 17 m/d (zie ”Verder te beschouwen bereik van hydraulische geleidbaarheid op basis van metingen” in §4.6.2.6.2). De gekozen waarde van de effectieve

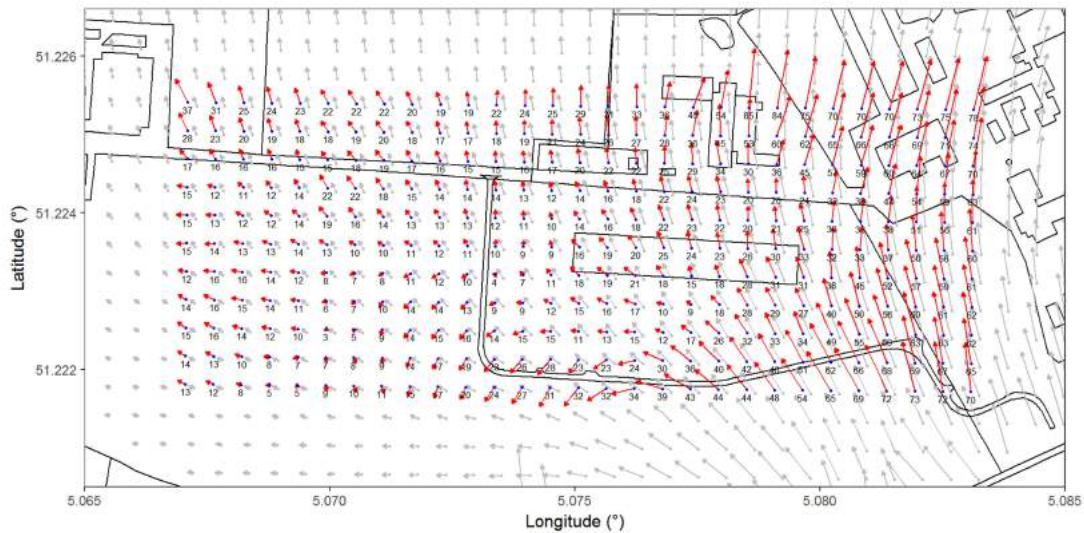
porositeit is hier van weinig belang, omdat dezelfde waarde gebruikt wordt voor alle omzettingen van gradiënten naar stroomsnelheden (zowel voor het modelresultaat als voor de geïnterpoleerde kaarten). De gekozen waarden voor de hydraulische geleidbaarheid zijn echter wel van belang. Deze zijn representatief voor de lagen “Boven-Mol & Quartair” van de aquifer, de belangrijkste zone in het kader van potentiële radionuclidentransport. Deze *in situ* metingen tonen duidelijk aan dat de hydraulische geleidbaarheid in de Boven-Mol Zanden in de omgeving van de toekomstige bergingsinstallatie groter is dan de gekalibreerde waarde (8,3 m/d) die in het Lokale grondwatermodel wordt gebruikt.

## 2. Resultaten op basis van metingen en op basis van het model

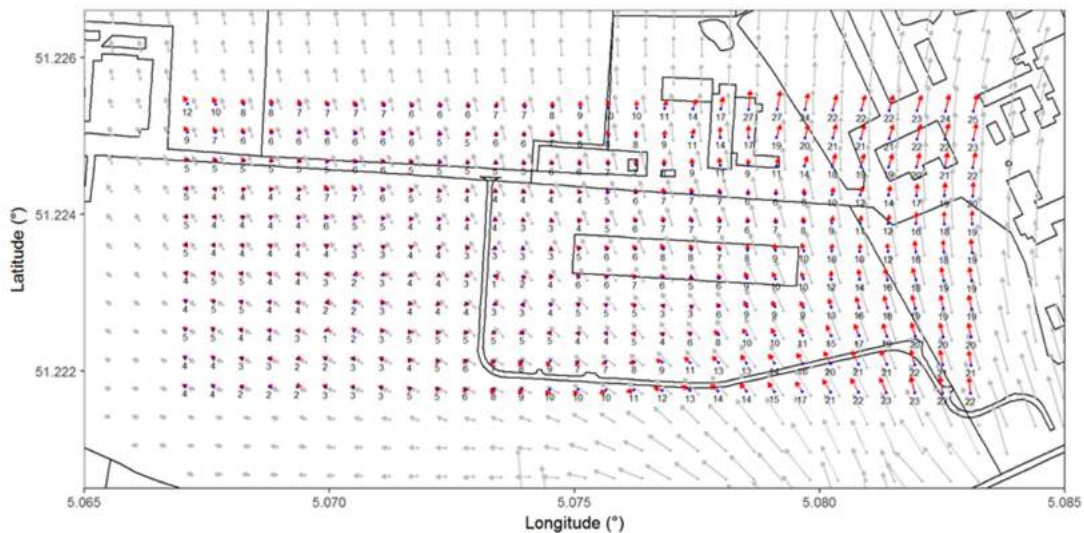
De gemiddelde stromingsvectoren voor de periode 2001-2016, opnieuw gebruik makende van een effectieve porositeit van 20% en een K waarde van 17 m/d, zijn weergegeven in Figuur 4 - 110. Het onzekerheidsinterval hierop, gebruik makende van de K waarden 5,5 en 55 m/d, wordt geïllustreerd in Figuur 4 - 111 en Figuur 4 - 112. Verder werd dezelfde werkwijze gebruikt voor de modelresultaten, in Figuur 4 - 113 met de K waarde voor het Quartair & Boven-Mol (8,3 m/d), en in Figuur 4 - 114 met de K waarde voor Onder-Mol & Kasterlee Zand (13,8 m/d). Het bereik van stroomsnelheden die in elk van deze gevallen voorkomt ter hoogte van de bergingssite en de zone 70 m ten noorden ervan, is samengevat in Tabel 4 - 58.

**Tabel 4 - 58: Overzicht van de hydraulische geleidbaarheid (in m/d) en de geschatte minimum en maximum stroomsnelheden (in m/a) ter hoogte van de installatie, inclusief de zone 70 m ten noorden ervan.**

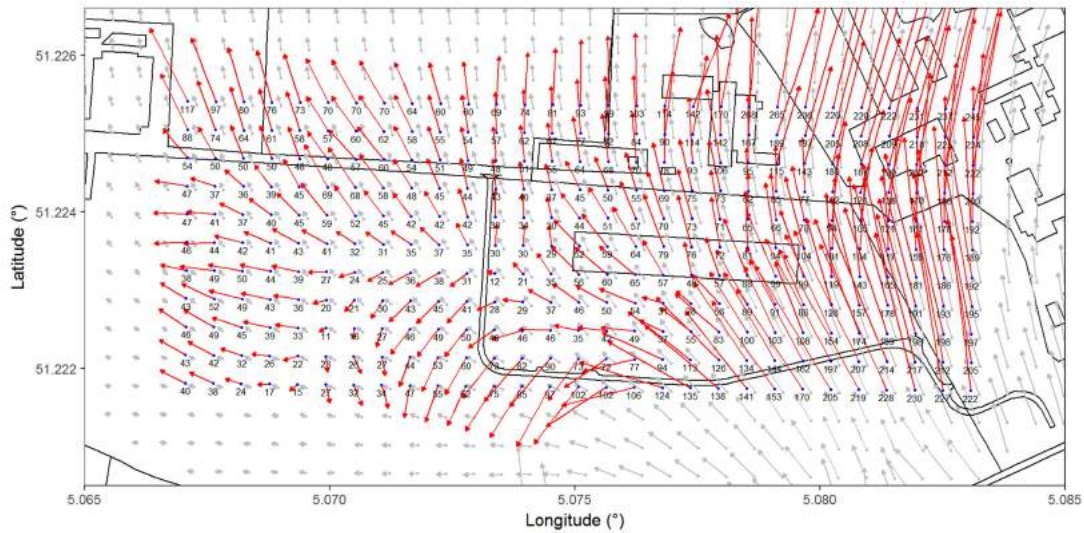
Bron	K (m/d)	Stroomsnelheid (m/a)	
		Minimum	Maximum
Data 2001-2016	17	14	31
	5,5	4	10
	55	44	99
Model	8,3 (Quartair & Boven-Mol)	21	32
	13,8 (Onder-Mol & Kasterlee Zand)	35	54



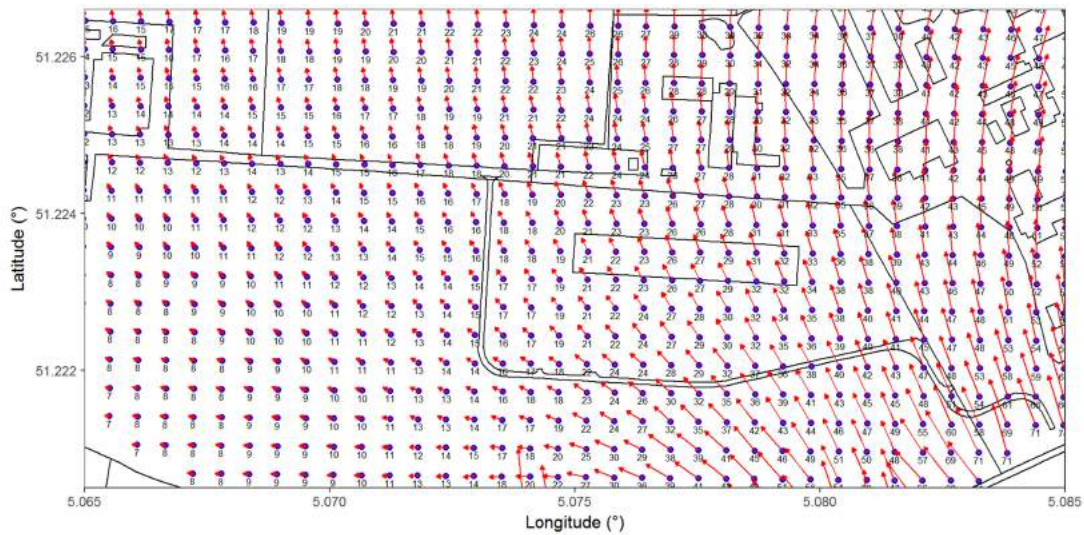
Figuur 4 - 110: Overzicht van de som van de dagelijkse stromingsvectoren (richting en grootte) voor de periode 2001-2016. De grootte van de stroomsnelheid (m/a) werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van 17 m/d. Deze figuur bevat dezelfde informatie als Figuur 4 - 100, maar hier werden de vectoren van Figuur 4 - 113 van de modelresultaten in het lichtgrijs toegevoegd om een directe vergelijking tussen beiden mogelijk te maken.



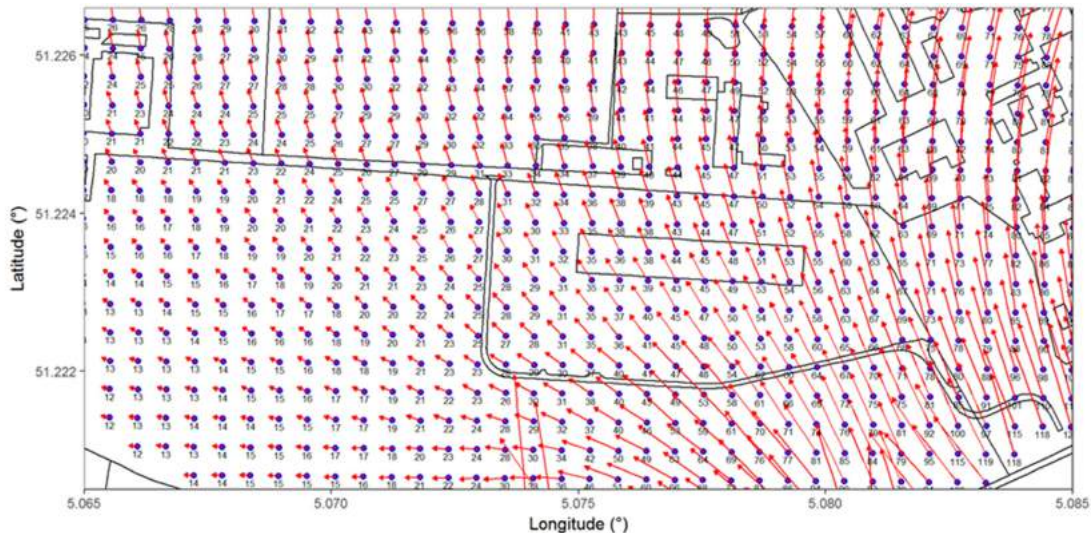
Figuur 4 - 111: Overzicht van de som van de dagelijkse stromingsvectoren (richting en grootte) voor de periode 2001-2016. De grootte van de stroomsnelheid (m/a) werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van 5,5 m/d. De vectoren van Figuur 4 - 113 werden hier in het lichtgrijs toegevoegd om een directe vergelijking met de modelresultaten mogelijk te maken.



Figuur 4 - 112: Overzicht van de som van de dagelijkse stromingsvectoren (richting en grootte) voor de periode 2001-2016. Degrootte van de stroomsnelheid (m/a) werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van 55 m/d. De vectoren van Figuur 4 - 113 werden hier in het lichtgrijs toegevoegd om een directe vergelijking met de modelresultaten mogelijk te maken.



Figuur 4 - 113: Overzicht van de stromingsvectoren (richting en grootte) op basis van de grondwatertafel gesimuleerd door het Lokale grondwatermodel. De grootte van de stroomsnelheid (m/a) werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van 8,3 m/d (Quartair & Boven-Mol). Deze figuur bevat dezelfde informatie als Figuur 4 - 96.



**Figuur 4 - 114: Overzicht van de stromingsvectoren (richting en grootte) op basis van de grondwatertafel gesimuleerd door het Lokale grondwatermodel. De grootte van de stroomsnelheid (m/a) werd berekend op basis van een effectieve porositeit van 20 % en een hydraulische geleidbaarheid van 13,8 m/d (Onder-Mol & Kasterlee Zand).**

Deze resultaten tonen duidelijk aan dat er een vrij goede overeenkomst is tussen de stroomsnelheden voor de periode 2001-2016 op basis van de meest waarschijnlijke K, en deze voor de bovenste laag uit het model.

De tweede laag in het model heeft een grotere K waarde en leidt dus ook tot grotere stroomsnelheden. Deze zijn echter minder relevant, vermits we duidelijk hebben aangetoond dat in werkelijkheid de grootste stroomsnelheden in de eerste laag te verwachten zijn (zie §4.6.2.6.2). Ondanks de lokale afwijkingen in de hydraulische gradiënt tussen het model en de metingen (te hoge gradiënt in het model, beschreven door [R4-147]), en de lokale afwijkingen met betrekking tot de hydraulische geleidbaarheid (te lage K in het model), blijkt dus dat de stroomsnelheden wel degelijk vrij goed worden ingeschat, maar dat niet kan worden uitgesloten dat het model de stroomsnelheid overschat.

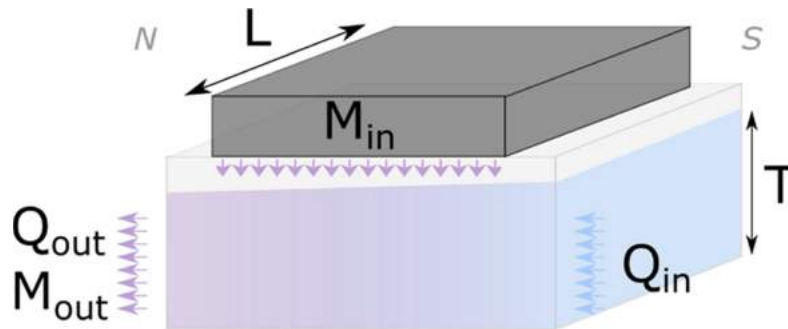
De stroomsnelheden voor de data 2001-2016 uit Tabel 4 - 58 zijn berekend aan de hand van de meest waarschijnlijke K en de uiterste waarden uit het K-interval (respectievelijk 5,5 en 55 m/d), die ongeveer overeenkomen met het 95% betrouwbaarheidsinterval voor de 'Direct Push' data in de Quartair & Boven-Mol eenheid (zie Figuur 4 - 88). De 25% en 75% kwantielen voor alle data van 'Direct Push' bedragen 7,7 m/d en 26,7 m/d. De combinatie tussen de uiterste K-waarden en de gemeten gradiënt is onwaarschijnlijk. De werkelijke stroomsnelheden zullen zich dan ook binnen een nauwer interval bevinden dan aangegeven in Tabel 4 - 58 die uitgaat van de extremen van de hydraulische geleidbaarheid.

#### **Impact op potentiële radionuclideconcentraties**

Om het effect van de stroomsnelheden, en de daarmee gepaard gaande onzekerheden, op potentiële radionuclideconcentraties in te schatten wordt gebruik gemaakt van het vereenvoudigde model voorgesteld in [R4-148], waar het omgekeerde van het debiet onder de tumulus,  $1/Q_{in}$ , wordt gebruikt als een proxy voor de



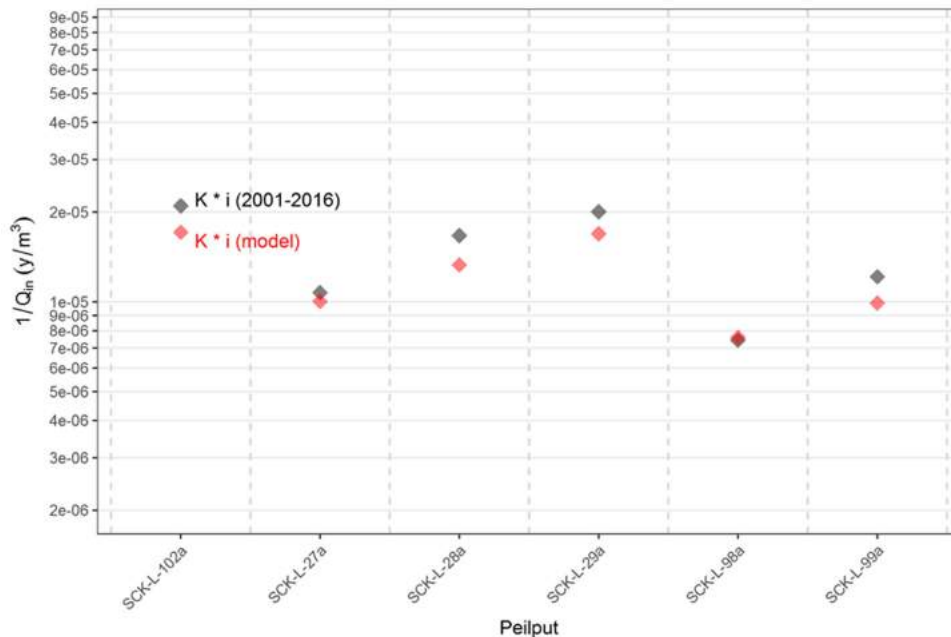
geotransferfactor.  $1/Q_{in}$  is echter niet rechtstreeks te relateren aan de geotransferfactor berekend aan de hand van het Lokaal grondwatermodel. De verklaring voor het gebruik van  $1/Q_{in}$  wordt geschetst in Figuur 4 - 115: indien we de massa flux uit de installatie gelijkstellen aan deze in de aquifer ten noorden van de installatie, en de infiltratie over het oppervlak van de installatie verwaarlozen, dan kan de concentratie in de aquifer,  $M_{out}/Q_{out}$ , worden gelijkgesteld aan  $1/Q_{in}$  (eenheid: a/m<sup>3</sup>). Vermits  $Q_{in}$  het product is van het specifieke grondwaterdebiet met L en T ( $L*T$  is het doorstromingsoppervlak binnen de aquifer onder de installatie), kan  $Q_{in}$  berekend worden met behulp van de specifieke grondwaterdebieten afgeleid uit de hydraulische gradiënten en K bereik.



**Figuur 4 - 115: Concept van het vereenvoudigde model voor het bepalen van potentiële radionuclideconcentraties. L:** lengte van de installatie, **T:** dikte van de aquifer,  **$Q_{in}$ :** debiet over het oppervlak  $L * T$  aan de zuidkant van de installatie,  **$Q_{out}$ :** debiet over het oppervlak  $L * T$  aan de noordkant van de installatie,  **$M_{in}$ :** massa flux uit de installatie,  **$M_{out}$ :** massa flux in de aquifer aan de noordkant van de installatie.

Een overzicht van alle  $1/Q_{in}$  waarden die op deze manier berekend werden voor de zes locaties van de dilutietest peilputten, is weergegeven in Figuur 4 - 116. Twee bronnen van informatie worden vergeleken:

- De resultaten op basis van de K waarde van 17 m/d, en de gemiddelde hydraulische gradiënt voor de periode 2001-2016. Deze resultaten komen overeen met de stroomsnelheden voorgesteld in Figuur 4 - 110;
- De resultaten op basis van het Lokale grondwatermodel, i.e. op basis van de gemiddelde flux gesimuleerd langsheen de lengte van de filter. Dit komt overeen met de stroomsnelheden in Figuur 4 - 113 voorgesteld (enkel de Quartair & Boven-Mol modelresultaten werden gebruikt).



**Figuur 4 - 116: Overzicht van de  $1/Q_m$  waarden bekomen uit de specifieke grondwaterdebieten op basis van de hydraulische gradiënten (i: gemiddelde 2001-2016) en een K-waarde van 17 m/d (zwart), alsook de specifieke grondwaterdebieten gesimuleerd door het model (rood), voor de locaties van de zes peilputten waar dilutietesten uitgevoerd werden.**

Een vergelijking tussen de resultaten van de kartering van de grondwatertafel en de resultaten voor de bovenste laag van het Lokale grondwatermodel in Figuur 4 - 116 toont aan dat er een goede overeenkomst is tussen beide.

#### Conclusie betreffende de meting van de stroomsnelheden op de site

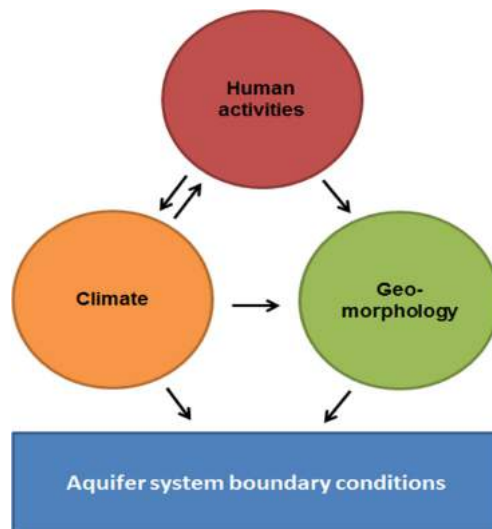
De schattingen van de stroomsnelheid via dilutietesten en via kartering van de grondwatertafel voor de oostelijke tumulus, rekening houdend met een 'beste schatting' waarde van de hydraulische geleidbaarheid, stemmen beide overeen met de stroomsnelheden uit het Lokale grondwatermodel gebruikt om een inschatting van de geotransferfactor tussen modules en een waterput aan de voet van de tumulus te verkrijgen. De doelstelling van het model is om een conservatieve inschatting van die geotransferfactor te bepalen. Op basis van de verkregen resultaten lijkt het onwaarschijnlijk dat het Lokale grondwatermodel aanleiding zou geven tot een belangrijke overschatting van de grondwaterstroomsnelheden en onderschatting van de geotransferfactor.

Omwille van de afwijkingen in de gradiënten en de gebruikte K-waarden tussen het model en metingen kan het model op zich nog niet bevestigd worden. Pompproeven op de site moeten de geschatte K-waarden bevestigen voor de bovenste aquifer. Ook zal tegen de tweede wetenschappelijke raad een aangepast hydrogeologisch model worden opgesteld dat rekening houdt met het geheel van de meetresultaten waaruit de nieuwe geotransferfactor voor de oostelijke tumulus zal worden afgeleid. De huidige resultaten tonen echter wel aan dat de gesimuleerde stroomsnelheden wel degelijk bevestigd kunnen worden.

### Toekomstige veranderingen aan de hydrogeologie

Op lange termijn worden veranderingen in het aquifersysteem verwacht. De veranderingen in hydrogeologie houden verband met de verwachte veranderingen in klimaat, geomorfologie en menselijke activiteiten. Deze drie factoren staan met elkaar in verband, vermits menselijke activiteiten het klimaat en de geomorfologie kunnen beïnvloeden. Het klimaat kan op zijn beurt weer een invloed uitoefenen op de geomorfologie en menselijke activiteiten. Deze wisselwerking is schematisch voorgesteld in Figuur 4 - 117.

De reikwijdte en het effect van natuurlijke wijzigingen voor de lokale hydrogeologie blijft moeilijk te voorspellen. In geval van toekomstige menselijke acties is dit zelfs nagenoeg onmogelijk, in het licht van de inherente maatschappelijke onzekerheden op zeer lange tijdschalen. In de geschiedenis van de mensheid zijn talloze voorbeelden terug te vinden van veranderingen aan de natuurlijke omgeving ten gevolge van menselijke activiteiten. Mogelijke toekomstige menselijke acties opnemen in de hydrogeologische modellen en hun impact schatten, vraagt een gedetailleerde bepaling van de locatie, geometrie en fysische parameters, die alle inherent onvoorspelbaar zijn.



Figuur 4 - 117: Wisselwerking tussen menselijke activiteiten, klimaat en geomorfologie en hun invloed op de randvoorwaarden van het aquifersysteem.

#### 1. Schatting van de impact van klimaatswijzigingen op de hydrogeologie

Over de relevante tijdschalen die worden beschouwd voor de evaluatie van de oppervlaktebergingsinrichting in Dessel worden drie mogelijke klimaattoestanden in acht genomen (zie ook Figuur 4 - 37 in 4.4.3.2):

- een Cs-klimaat (subtropisch met droge zomers),
- een Cs-klimaat met stijging van de zeespiegel,
- een DO-klimaat.

We verwachten gedurende de volledige periode relevant voor de evaluatie van de veiligheid op lange termijn, na sluiting van de bergingsinrichting, een subtropische klimaattoestand. De aanwezige onzekerheden hebben niet zozeer betrekking op de aard van de klimaattoestand dan wel op de grootte van de temperatuur- en neerslagrespons.

Om een range van mogelijke klimaatomstandigheden te definiëren op basis van de beschikbare voorspellingen, met bijzondere aandacht voor de temperatuur, neerslaghoeveelheid en verdeling van de neerslag en temperaturen doorheen de seizoenen, wordt gebruikt gemaakt van de CCI-HYDR studies [R4-50]. Hierin worden, op basis van zgn. perturbatiefactoren voor de parameters<sup>48</sup> van het huidige klimaat, 3 scenario's gedefinieerd (zie ook 4.4.3.3):

- een "hoog/nat" scenario met natte winters en droge zomers: infiltratie van 210 mm/a<sup>49</sup>;
- een "laag/droog" scenario met droge winters en droge zomers, infiltratie van 162 mm/a;
- een "gemiddeld" scenario: infiltratie van 190 mm/a.

Door de afname in regionale infiltratie, wordt een tragere waterstroming verwacht voor de alle CCI-HYDR scenario's. Algemeen genomen, gaan de stijghoogtes in de omgeving van de site tijdens een toekomstig klimaat verlagen omwille van de kleinere infiltratie. Deze verlaging van de watertafel heeft als gevolg dat de waterscheidingslijn zich zuidwaarts verplaatst waardoor de noordwaartse stroming geaccentueerd wordt (zie ook verder Figuur 4 - 124)

De simulatieresultaten van de hoogte van de watertafel voor de drie CCI-HYDR scenario's met de artificiële invloed van het kanaal zijn weergegeven in het bovenste deel van Figuur 4 - 126, Figuur 4 - 127 en Figuur 4 - 128. De verschillen in stijghoogte zijn miniem. Dit geldt trouwens ook voor de situatie zonder kanaal (onderste deel van de drie desbetreffende figuren). Ook de stromingsrichting wijzigt quasi niet voor de huidige klimaatstoestand en de drie beschouwde toekomstige scenario's (zie verder Figuur 4 - 118). Op diezelfde figuur wordt ook aangetoond dat de stroomsnelheid (grootte van de pijlen) zeer weinig variatie vertoont in functie van een wijziging van het klimaat.

## 2. Schatting van de impact op de hydrogeologie van door mensen aangebrachte veranderingen

Op basis van de GTF-modellering voor alternatieve klimaatomstandigheden (zie ook [HS14] en meer bepaald §14.4.5.4 en §14.4.5.5.2) en de grondwatermodellering ([OD-026] en daarin vermelde referenties), kan wel een gevoeligheidsstudie gemaakt worden van de invloed van mogelijke toekomstige door mensen geïnduceerde veranderingen. De volgende aspecten komen aan bod:

- wijziging in landgebruik;
- belangrijke extractie van grondwater;
- verandering in geometrie van rivieren/kanalen;
- zandwinning.

---

<sup>48</sup> precipitatie, evapotranspiratie, temperatuur en wind

<sup>49</sup> onder het huidige klimaat bedraagt de regionale infiltratie 306 mm/a.

#### 1. Wijziging in landgebruik

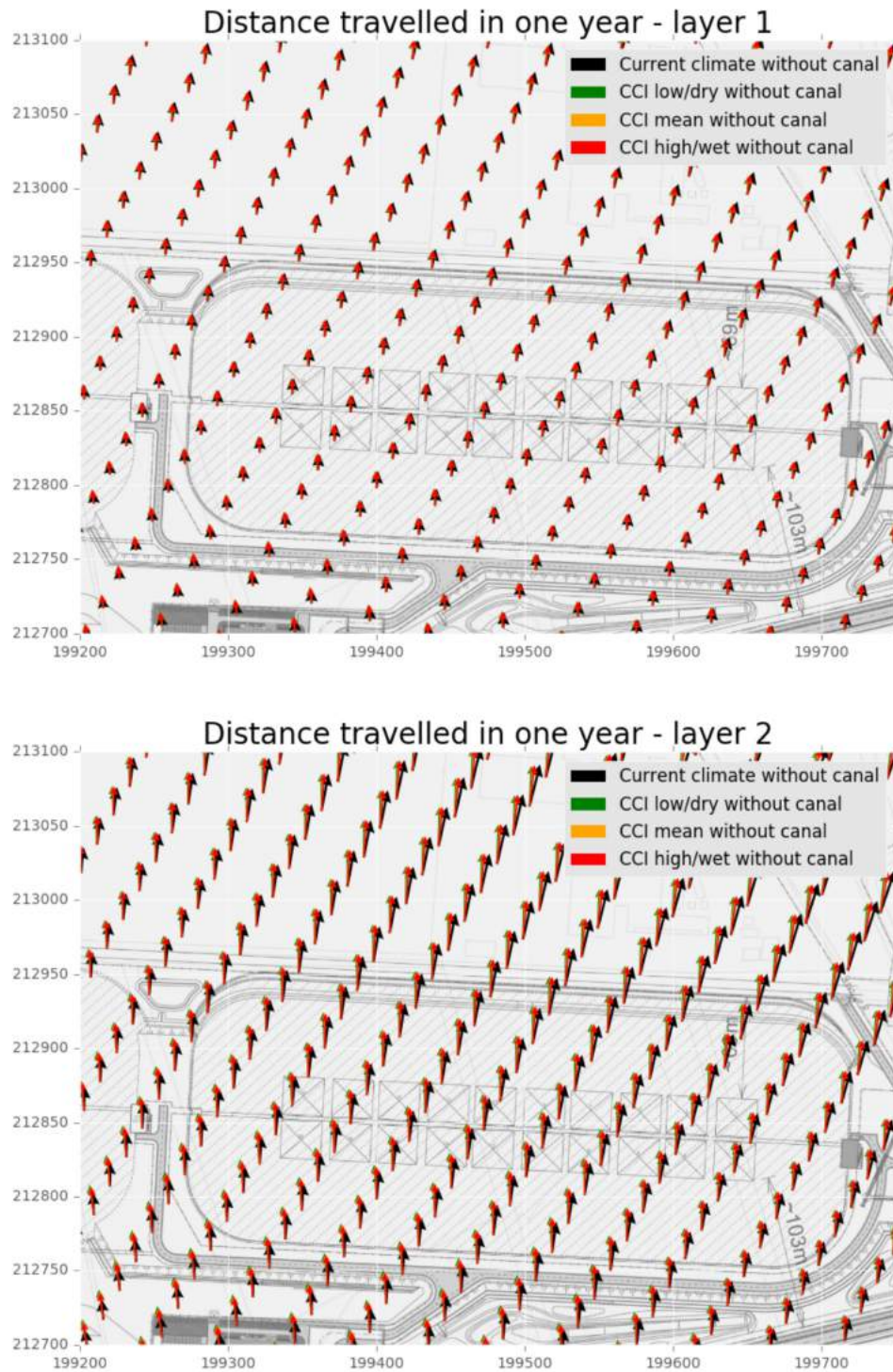
Wijzigingen in landgebruik kunnen aanleiding geven tot wijzigingen in de regionale infiltratie, daar zij typisch de verhouding tussen afstroming (run-off), evapotranspiratie en drainage wijzigen. Deze wijziging kan dan op zijn beurt de waarde van de GTF beïnvloeden.

De coherentie met het biosfeermodel, waar wordt uitgegaan van een landbouwgemeenschap die in volledige zelfvoorziening leeft, gebiedt te onderstellen dat er een gemengd landgebruik (akkerbouw, groenten- en fruitteelt, grasland) zal zijn. In de berekening van de GTF wordt uitgegaan van een regionale infiltratie berekend voor grasland, wat aanvaardbaar is aangezien:

- men voor gemengd landgebruik een iets hogere gemiddelde jaarlijkse regionale infiltratie verwacht [R4-114]; en
- de GTF weinig gevoelig is aan kleine variaties op infiltratie, zoals blijkt uit het GTF bereik voor de verschillende CCI-HYDR klimaatscenario's in [HS14] §14.4.5.5.2.

Een wijziging in infiltratie zal ook een zeer beperkte invloed op de grondwaterstroomrichting teweegbrengen. In Figuur 4 - 118 wordt getoond dat verschillende infiltraties, zijnde 162, 190 en 210 mm/a (voor de verschillende CCI-HYDR klimaatscenario's (zie [HS14] §14.4.5.4 en §14.4.5.5.2), geen verschillen in stroomrichting geven (overlappende pijlen). Deze stroomrichtingen wijken ook niet veel af van de stroomrichting bij een infiltratie voor het huidige klimaat van 306 mm/a. Deze simulaties zijn uitgevoerd voor de situatie zonder kanaal omdat er in aanwezigheid van het kanaal een nog kleiner effect zou zijn door de voeding vanuit het kanaal naar de aquifer.

Het effect van de bergingsinstallatie zelf op de infiltratie blijft eveneens beperkt. Door de infiltratiebekkens zullen de pieken van infiltratie bij wisselende weersomstandigheden worden afgevlakt en gestabiliseerd in de tijd. Deze toestand komt trouwens ook beter overeen met het model dat *steady state* condities verondersteld (§2.1.2 in [OD-026]).



Figuur 4 - 118: Invloed op grondwaterstroomrichting en stroomsnelheid van verschillende infiltraties voor de verschillende CCI-HYDR klimaatscenario's. De resultaten voor de verschillende scenario's overlappen elkaar in grote mate.

## 2. Belangrijke extractie van grondwater

De aanwezigheid van waterputten met een hoog pompdebiet kan het stromingsveld lokaal beïnvloeden. De onttrekkingskegel die zich rond pompputten vormt, leidt tot grotere gradiënten die op hun beurt de grondwaterstroming kunnen versnellen. De versnelde grondwaterstroming kan de dilutie zelfs verhogen, indien de put stroomafwaarts gelokaliseerd is.

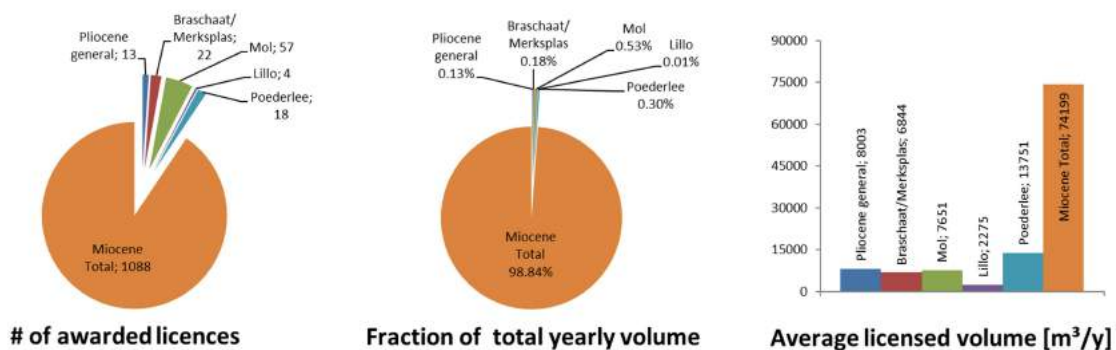
Voor de site van Dessel wordt echter geen groot effect verwacht bij een belangrijke extractie van grondwater. Ter ondersteuning van deze stelling komen twee elementen aan bod:

- in de bovenste (Pliocene) aquifer zijn putten met groot debiet weinig waarschijnlijk;
- veranderingen in de grootte en richting van de grondwaterstroming onder de tumuli ten gevolge van pumping zijn beperkt.

### Extractie van grondwater in de Pliocene aquifer

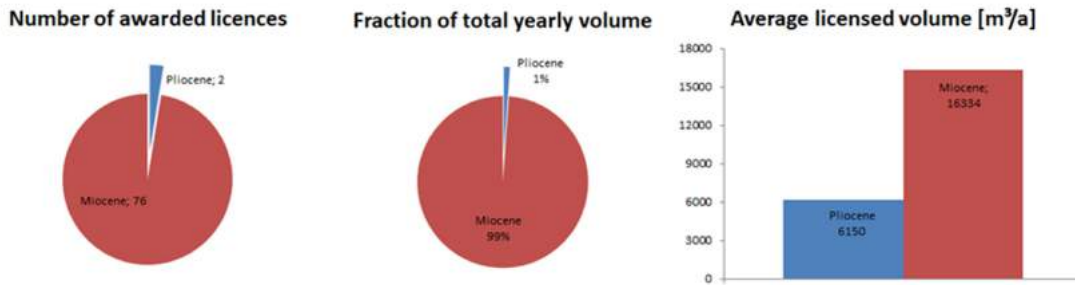
Algemeen kan gesteld worden dat, in het licht van de gesatureerde dikte van de aquifers op de site, de Pliocene (bovenste) aquifer zich minder leent tot belangrijke extracties van grondwater dan de Mioceen (onderste) aquifer waarin de Zanden van Diest de belangrijkste watervoerende laag uitmaken. Inderdaad is de Pliocene aquifer slechts ongeveer 30 meter dik, terwijl de Mioceen aquifer ongeveer 120 meter dik is. Bovendien zijn in de Mioceen aquifer grotere extracties mogelijk zonder het risico dat de betrokken put droogvalt. De hydraulische geleidbaarheid van de watervoerende lagen van beide aquifers is vergelijkbaar qua grootteorde.

De relatieve ongeschiktheid van de Pliocene aquifer voor grondwaterextracties wordt bevestigd door de gegevens in de databank vergunningen van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). In het stroombekken van de Nete is zowel het aantal vergunningen als het totale vergunde extractievolume veel groter in de Mioceen aquifer (Figuur 4 - 119; Figuur 4 - 120). Ook het gemiddelde vergunde extractievolume is veel groter in de Mioceen aquifer (87 633 m<sup>3</sup>/a); in de Pliocene aquifer bedraagt dit slechts 2 275 tot 13 751 m<sup>3</sup>/a, afhankelijk van de locatie.



Figuur 4 - 119: Geselecteerde statistieken uit de VMM databank van grondwaterextracties voor het Mioceen (bruin) en het Pliocene (andere kleuren) voor het stroombekken van de Nete.

In het gebied afgedekt door het Lokale Model voor grondwaterstroming dat representatiever is voor de site dan het volledige Netestroombekken, zijn slechts twee vergunningen uitgereikt voor extracties uit de Pliocene aquifer tegenover 76 voor de Mioceen aquifer (Figuur 4 - 119). Het vergunde volume voor de Pliocene aquifer bedraagt 1% van het totale vergunde volume; het gemiddelde vergunde volume is 6 150 m<sup>3</sup>/a.



**Figuur 4 - 120: Geselecteerde statistieken uit de VMM databank van grondwaterextracties voor het gebied afgedekt door het Lokale model.**

Uit deze statistieken kunnen we concluderen dat extractievolumes groter dan 20 000 m<sup>3</sup>/a nu en in de toekomst weinig waarschijnlijk zijn in de Pliocene aquifer.

Bij een belangrijke extractie uit de Mioceen aquifer worden geen wijzigingen in de grondwaterstroming verwacht in de Pliocene aquifer. Beide aquifers worden immers gescheiden door de Kasterlee Klei (aquitard), die voldoende weerstand heeft om pompeffecten van belangrijke extracties te dempen. Dit werd aangetoond tijdens de pomptesten op de site in 2008: een debiet van 58,5 m<sup>3</sup>/h (512 811 m<sup>3</sup>/a) in de Mioceen aquifer (Zanden van Diest) had geen implicaties op de Pliocene aquifer.

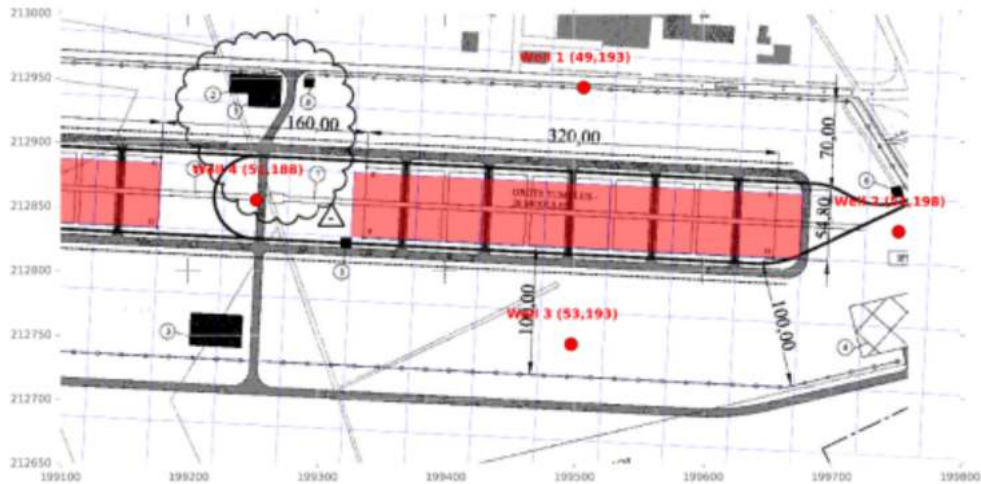
#### Effect op grootte en richting van grondwaterstroming bij extractie uit de Pliocene aquifer

Voor de kwantitatieve analyse van het effect bij extractie op de grondwaterstroming beschouwen we vier analyses met een put met een extractievolume van 20 000 m<sup>3</sup>/a die zich respectievelijk ten noorden, ten oosten, ten zuiden en ten westen van de oostelijke tumulus bevindt (Figuur 4 - 121). Telkens wordt een put beschouwd die zich uitstrekt over de volledige diepte van deze aquifer en wordt nagegaan hoe de oriëntatie en de grootte van de grondwaterstroming onder de tumuli wijzigt ten opzichte van de huidige situatie gemodelleerd in het Lokale Model. Voor deze analyses wordt het Lokale grondwatermodel (cellen van 50 × 50 m) gebruikt, en niet het kleinere en fijner gediscretiseerde transportmodel (cellen van 10 × 10 m), omdat de gesimuleerde afpompingskegel buiten het domein van het transportmodel zou kunnen liggen en de vaste randvoorwaarden van het transportmodel de resultaten dan zouden vervormen.

In Figuur 4 - 122 worden de stroomsnelheidsvectoren en het relatief verschil in grootte van de stroomsnelheid tussen het geval met en zonder extractie weergegeven voor de bovenste twee lagen uit het model. De richting van de grondwaterstroming verandert slechts weinig in de buurt van de extracties (rode en blauwe pijlen overlappen in Figuur 4 - 122). De stroomsnelheid verhoogt telkens stroomopwaarts, i.e. zuidoostelijk van de



extractie, en verlaagt stroomafwaarts, i.e. noordwestelijk van de extractie. De verhoging en verlaging bedragen maximaal ongeveer 24% van de stroomsnelheid zonder extra extractie.



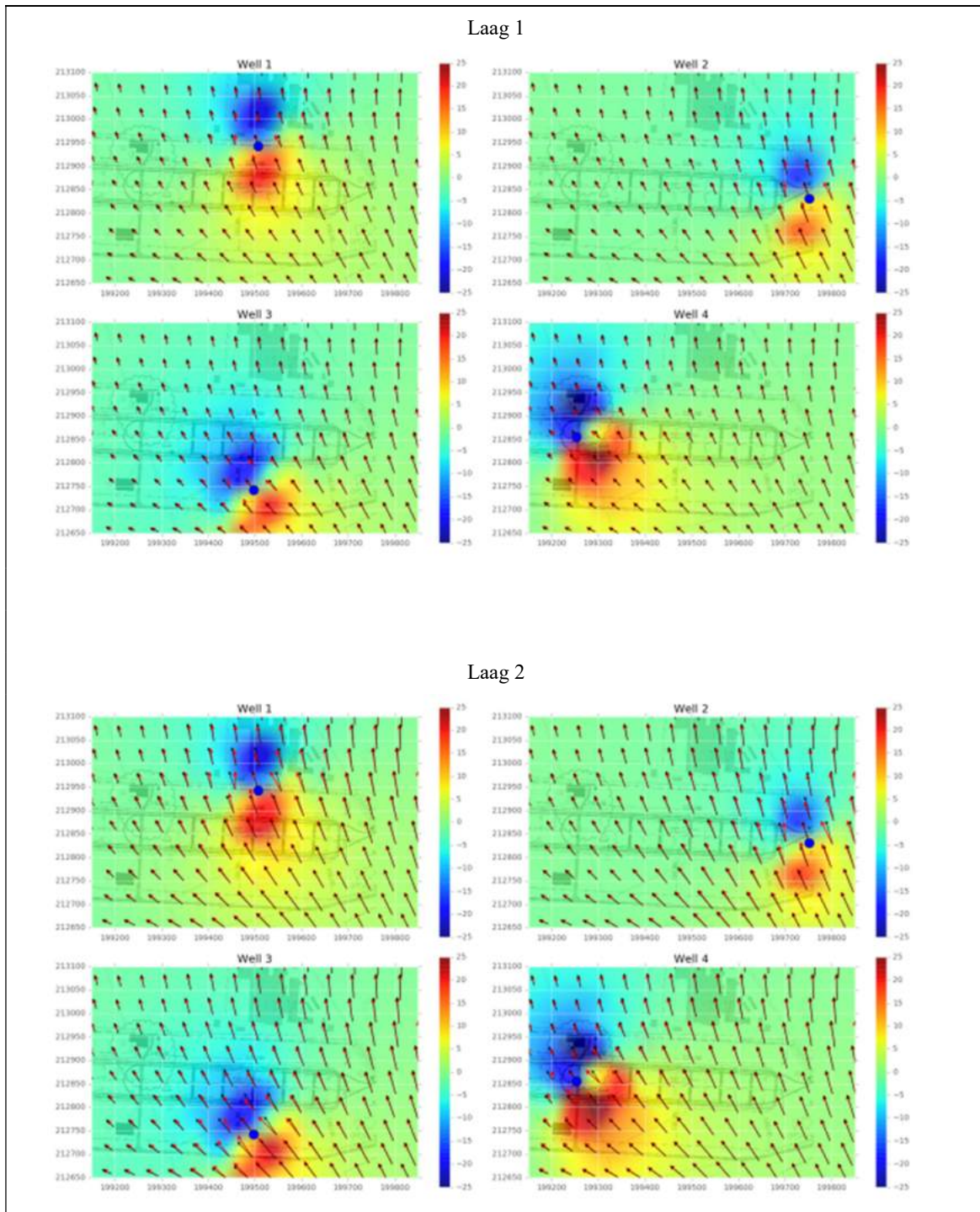
Figuur 4 - 121: Hypothetische posities van belangrijke grondwaterextractieputten rondom de oostelijke tumulus.

In Tabel 4 - 59 zijn de toename en de afname van de stroomsnelheid over de cellen onder de oostelijke tumulus weergegeven. Extracties ten noorden en ten westen van de tumulus veroorzaken een toename van de stroomsnelheid onder de tumulus. Voor extracties ten oosten en ten zuiden van de tumulus is er op sommige plaatsen een toename en op andere plaatsen een afname in stroomsnelheid. De afname in stroomsnelheid is het grootste voor de zuidelijke positie, waar ook gemiddeld over alle cellen onder de tumulus een afname is van ongeveer 7%.

Een beperkte afname van de stroomsnelheid onder de oostelijke tumulus kan aanleiding geven tot een beperkte vermindering van de dilutie (en beperkte verhoging van de GTF). Daar de afname van de stroomsnelheden onder de oostelijke tumulus gemiddeld beperkt blijft tot minder dan 7% en maximaal ongeveer 24% bedraagt, wordt dus geen significant effect verwacht op de GTF.

Tabel 4 - 59: Wijziging in stroomsnelheid over alle cellen onder de oostelijke tumulus en gemiddeld over de volledige Pliocene aquifer. Negatieve waarden duiden op een vermindering in stroomsnelheid.

Scenario	Maximale verandering	Minimale verandering	Gemiddelde verandering
Punt 1 (N)	8,76 %	3,21 %	6,01 %
Punt 2 (E)	5,85 %	-1,03 %	0,58 %
Punt 3 (S)	-23,66 %	1,90%	-6,81 %
Punt 4 (W)	8,93 %	1,22 %	3,91 %



Figuur 4 - 122: Stroomsnelheidsvectoren in de bovenste twee lagen uit het model in het geval van extractie in één van de 4 grondwaterextractieputten gesitueerd ten noorden van de oostelijke tumulus (linksboven), ten oosten (rechtsboven), ten zuiden (linksonder) en ten westen (rechtsonder).

### 3. Verandering in de geometrie van rivieren en kanalen

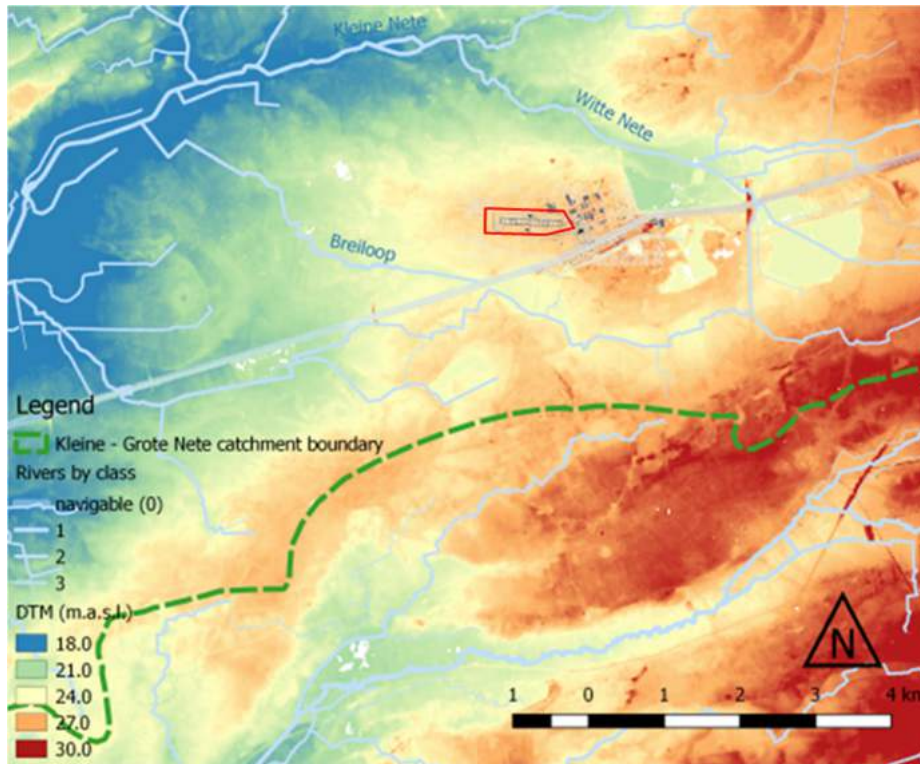
De geometrie van het huidige rivierenetwerk is het resultaat van menselijke activiteit. Oorspronkelijk meanderden de rivieren in de buurt van de site (Figuur 4 - 68), waardoor de grondwatertafels in hun stroomgebieden hoger waren (zie bijvoorbeeld p. 28 in [R4-164]).

De terugkeer van de geometrie van oppervlaktewateren naar een meer natuurlijke toestand, met inbegrip van het opnieuw creëren van meanders (zie §4.6.1.2.5), zal een beperkt effect hebben op de GTF, aangezien de site relatief ver van oppervlaktewateren verwijderd is. Er werd daarom geen expliciete modellering uitgevoerd.

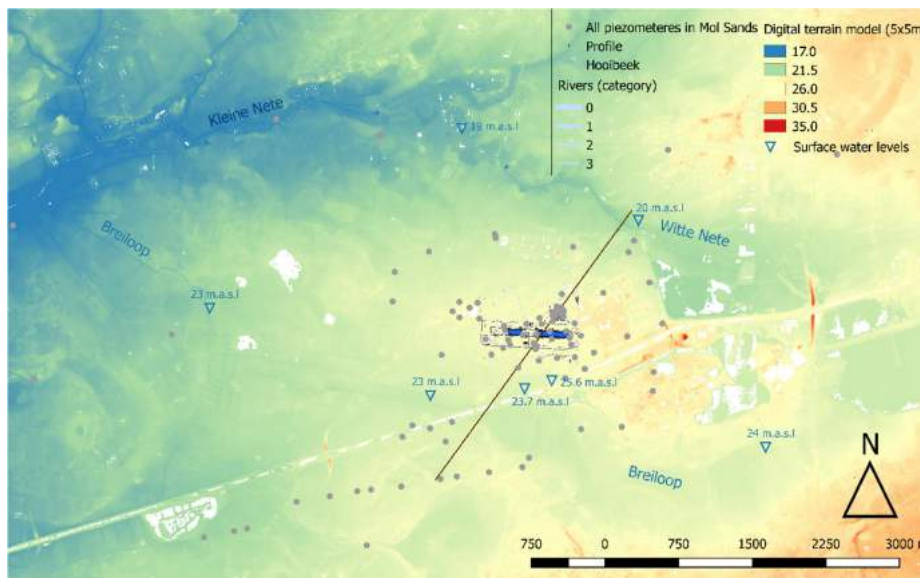
Een ander voorbeeld van menselijke activiteiten die de morfologie van de oppervlaktewateren beïnvloeden, is de aan-of afwezigheid van het kanaal Bocholt-Herentals nabij de site. Het waterstromingspatroon ten zuiden van de tumuli wordt beïnvloed door dit kanaal dat ten oosten van sas 6 de aquifer voedt (lek). Ook zonder kanaal wordt een noordwaarts gerichte stroming verwacht ter hoogte van de bergingssite om de volgende redenen:

- de waterscheiding tussen het bekken van de Kleine Nete en de Grote Nete is zuidwaarts van het kanaal gesitueerd (Figuur 4 - 123);
- de Breiloopten zuiden van de tumuli is hoger gelegen dan de Witte Nete (Figuur 4 - 124) en heeft een lagere waterafvoer dan de Witte Nete waardoor de waterscheiding tussen Witte Nete en Breiloopten zuiden van de bergingssite blijft bij afwezigheid van het kanaal (Figuur 4 - 125, Figuur 4 - 126, Figuur 4 - 127 en Figuur 4 - 128).

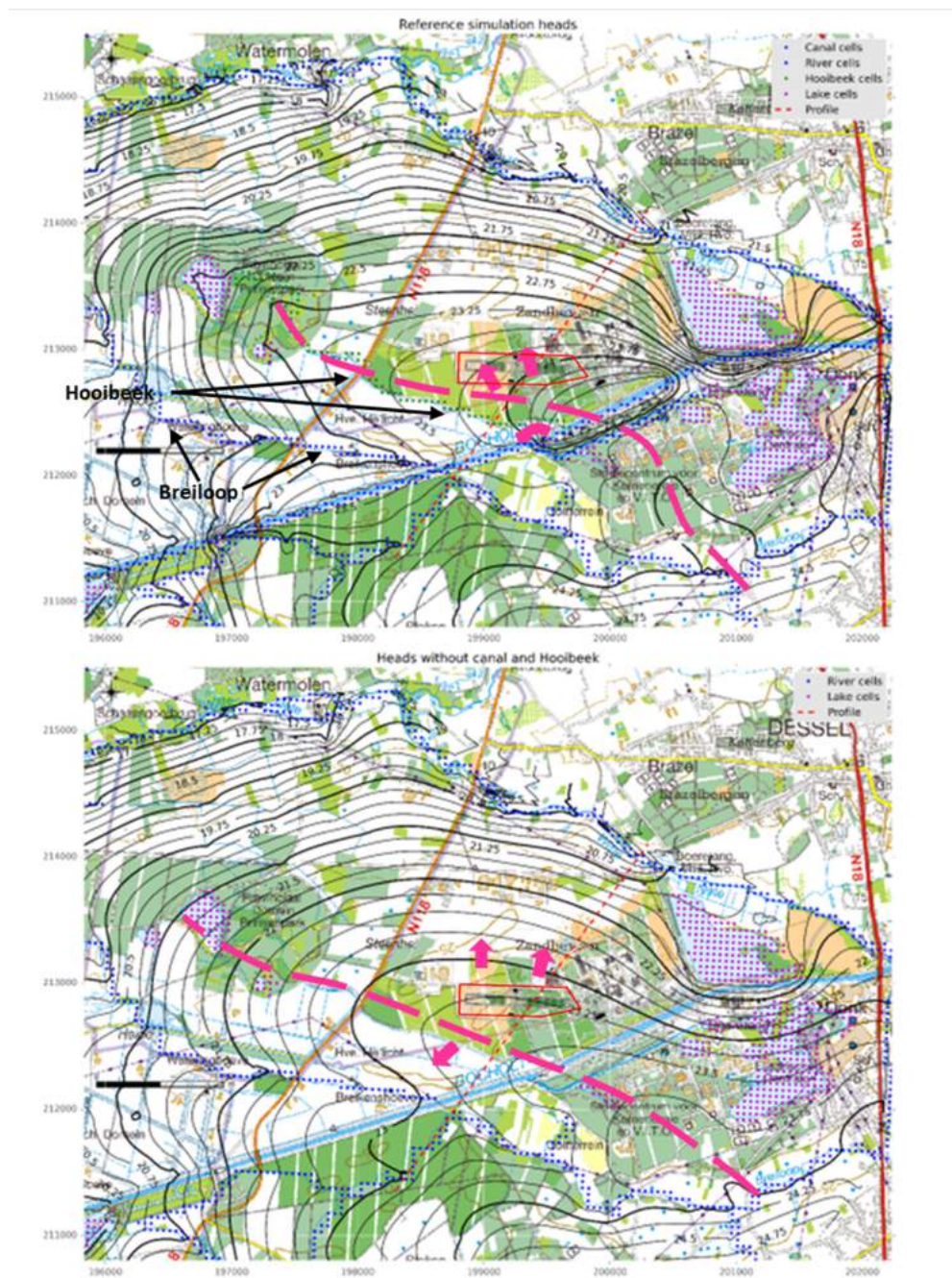
In het geval van het huidig klimaat veroorzaakt de afwezigheid van het kanaal een afname van de grondwaterstanden door het wegvallen van de artificiële voeding van het kanaal (lek). De vermindering van de grondwaterstanden bedraagt ongeveer 0,75 meter op de plaats van de oostelijke tumulus. Bij de mogelijke toekomstige klimaat scenario's zonder de artificiële voeding van het kanaal nemen de grondwaterstanden verder af als gevolg van de infiltratieafname. Voor het CCI-HYDR 'hoog' scenario bedraagt deze afname op de plaats van de oostelijke tumulus 1,25 meter ten opzichte van de huidige toestand. Voor de CCI-HYDR 'laag' en 'gemiddelde' scenario's nemen de grondwaterstanden nog verder met ongeveer 12 cm af ten opzichte van het CCI-HYDR 'hoog' scenario.



Figuur 4 - 123: Waterscheiding (groene streepjeslijn) tussen het bekken van de Kleine Nete/Witte Nete en die van de Grote Nete (ten zuiden van de bergingssite). DTM: topografie (m TAW).



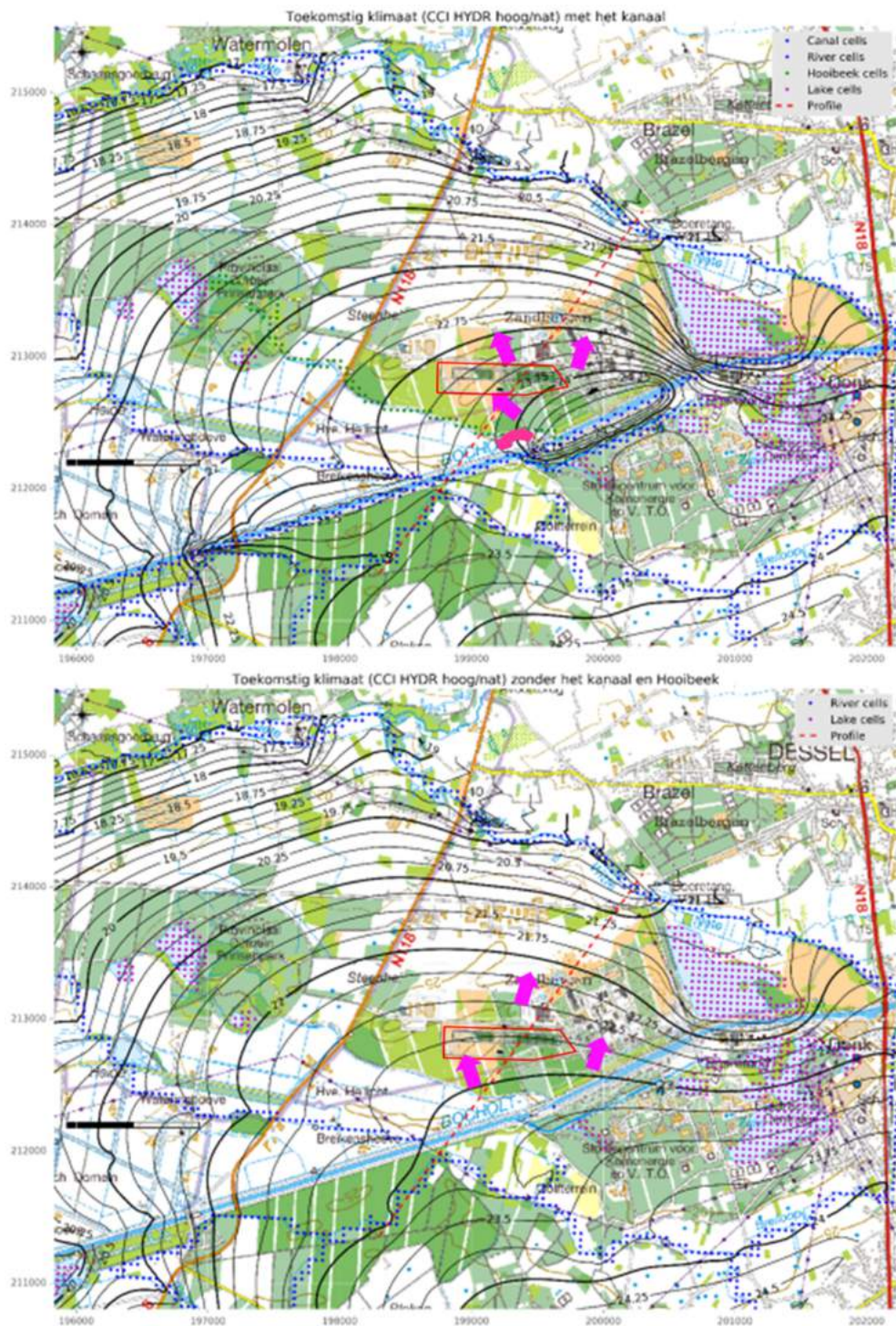
Figuur 4 - 124: Topografie van de omgeving van de bergingssite met aanduiding van de hoogte van de oppervlaktewateren, de plaats van piëzometers en aanduiding van sectie waarvoor in Figuur 4 - 129 een profiel getoond wordt (m.a.s.l. is TAW).



Figuur 4 - 125: Simulatieresultaten (steady state stromingsmodel) in het geval van de huidige situatie met de artificiële invloed van het kanaal (bovenste gedeelte) en zonder de invloed van het kanaal (onderste gedeelte). Bij de simulatie zonder kanaal is ook de Hooibek weggelaten. Beide simulaties werden uitgevoerd voor een infiltratie van 306 mm/a (langjaarlijks gemiddelde van regionale waarde van infiltratie voor het huidige klimaat).

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

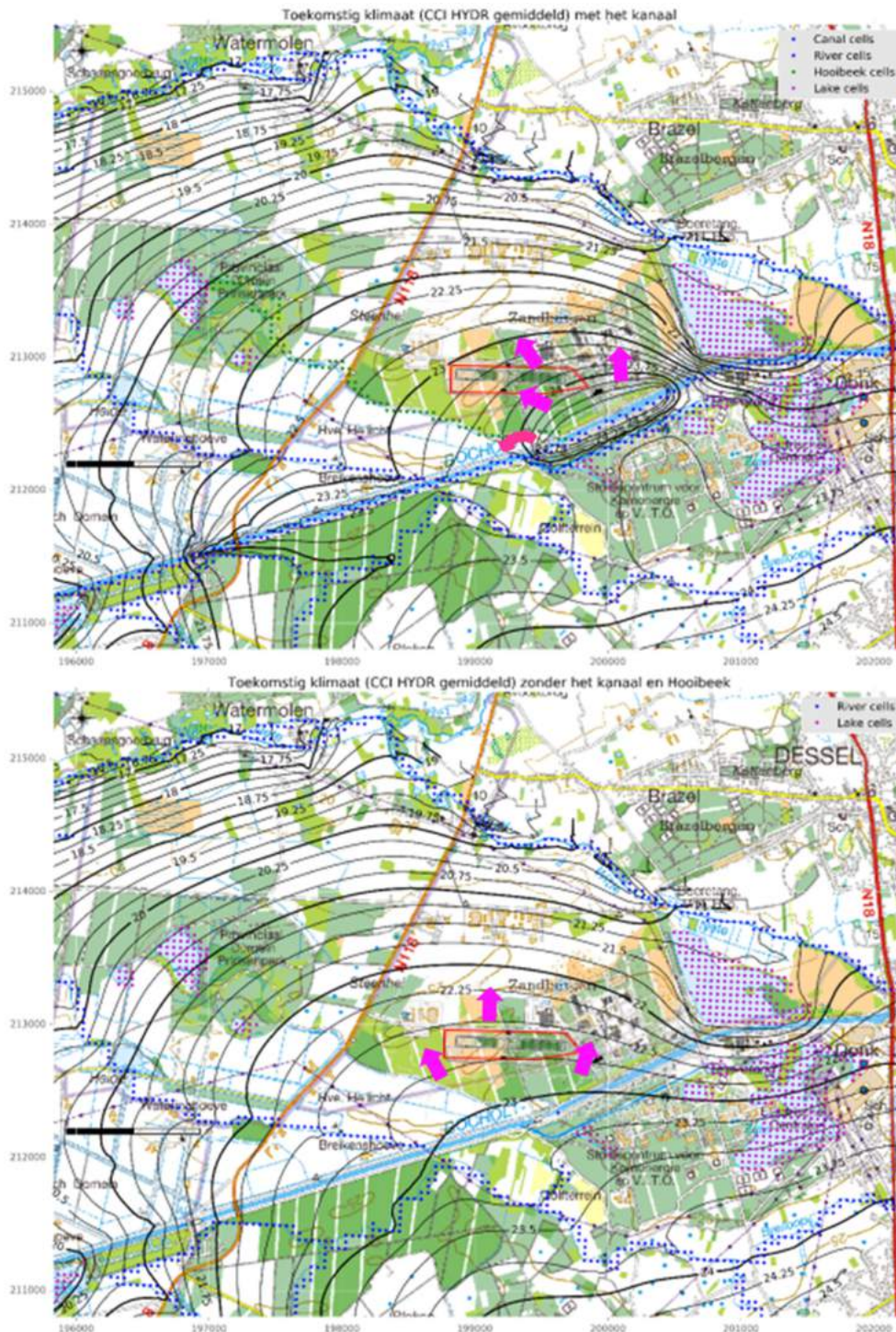
Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel



Figuur 4 - 126: Simulatieresultaten (steady state stromingsmodel) in het geval van het toekomstige CCI HYDR hoog/nat klimaat met de artificiële invloed van het kanaal (bovenste gedeelte) en zonder de invloed van het kanaal (onderste gedeelte). Bij de simulatie zonder kanaal is ook de Hooibeek weggelaten.

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

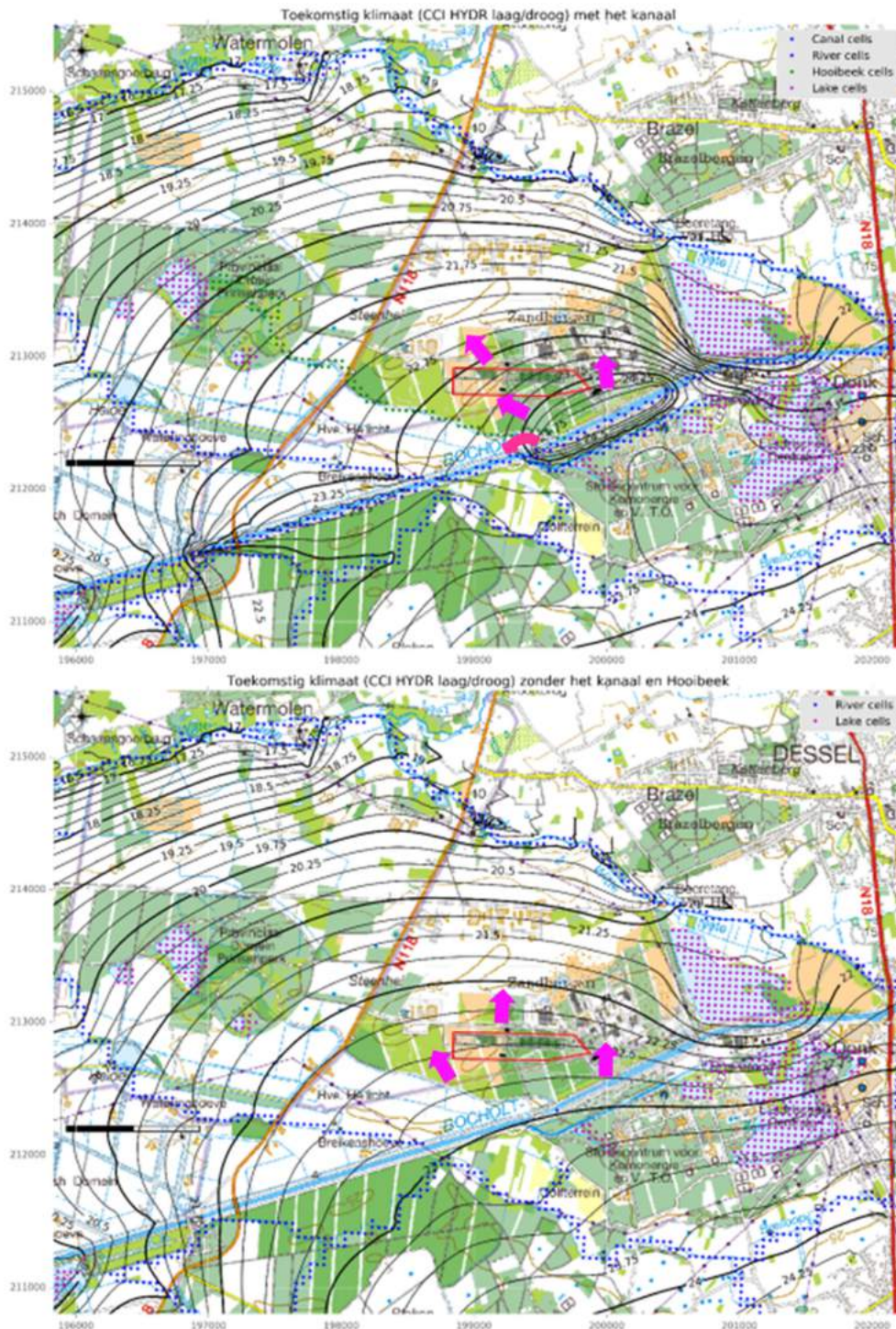
Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel



Figuur 4 - 127: Simulatieresultaten (steady state stromingsmodel) in het geval van het toekomstige CCI HYDR gemiddeld klimaat met de artificiële invloed van het kanaal (bovenste gedeelte) en zonder de invloed van het kanaal (onderste gedeelte).

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

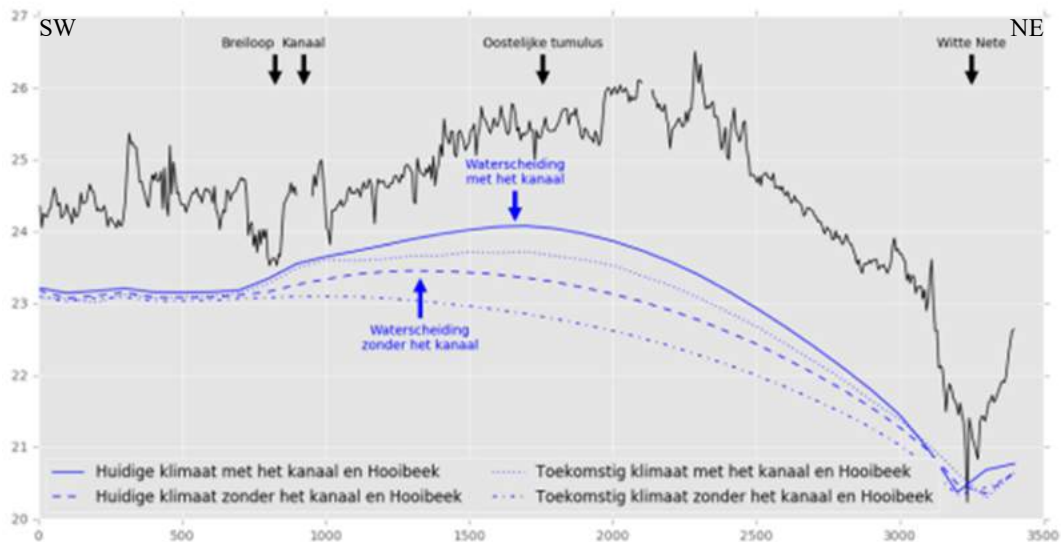
Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel



Figuur 4 - 128: Simulatieresultaten (steady state stromingsmodel) in het geval van het toekomstige CCI HYDR laag/droog klimaat met de artificiële invloed van het kanaal (bovenste gedeelte) en zonder de invloed van het kanaal (onderste gedeelte).



De resultaten van het stromingsmodel worden in Figuur 4 - 129 getoond aan de hand van een NE-SW geïoriënteerd profiel. Daarin wordt duidelijk gemaakt dat de grondwatertafel onder de oostelijke tumulus door de voeding uit het kanaal hoger ligt en weinig gradiënt vertoont op die plaats. Bij verdwijnen van de invloed van het kanaal is de gradiënt onder de oostelijke tumulus duidelijker naar de Witte Nete toe gericht en schuift de waterscheiding tussen Breilooop en Witte Nete naar het zuiden op (zie ook Figuur 4 - 125). In het geval van lagere infiltratie<sup>50</sup> (CCI-HYDR “hoog/nat”) is de waterscheiding tussen Breilooop en Witte Nete nog nauwelijks zichtbaar en is er onder de oostelijke tumulus nog steeds een gradiënt die gericht is naar de Witte Nete. Zonder kanaal migreert de waterscheiding nog verder zuidwaarts waarbij onder de oostelijke tumulus een eenduidige noordwaartse gradiënt ontwikkelt.



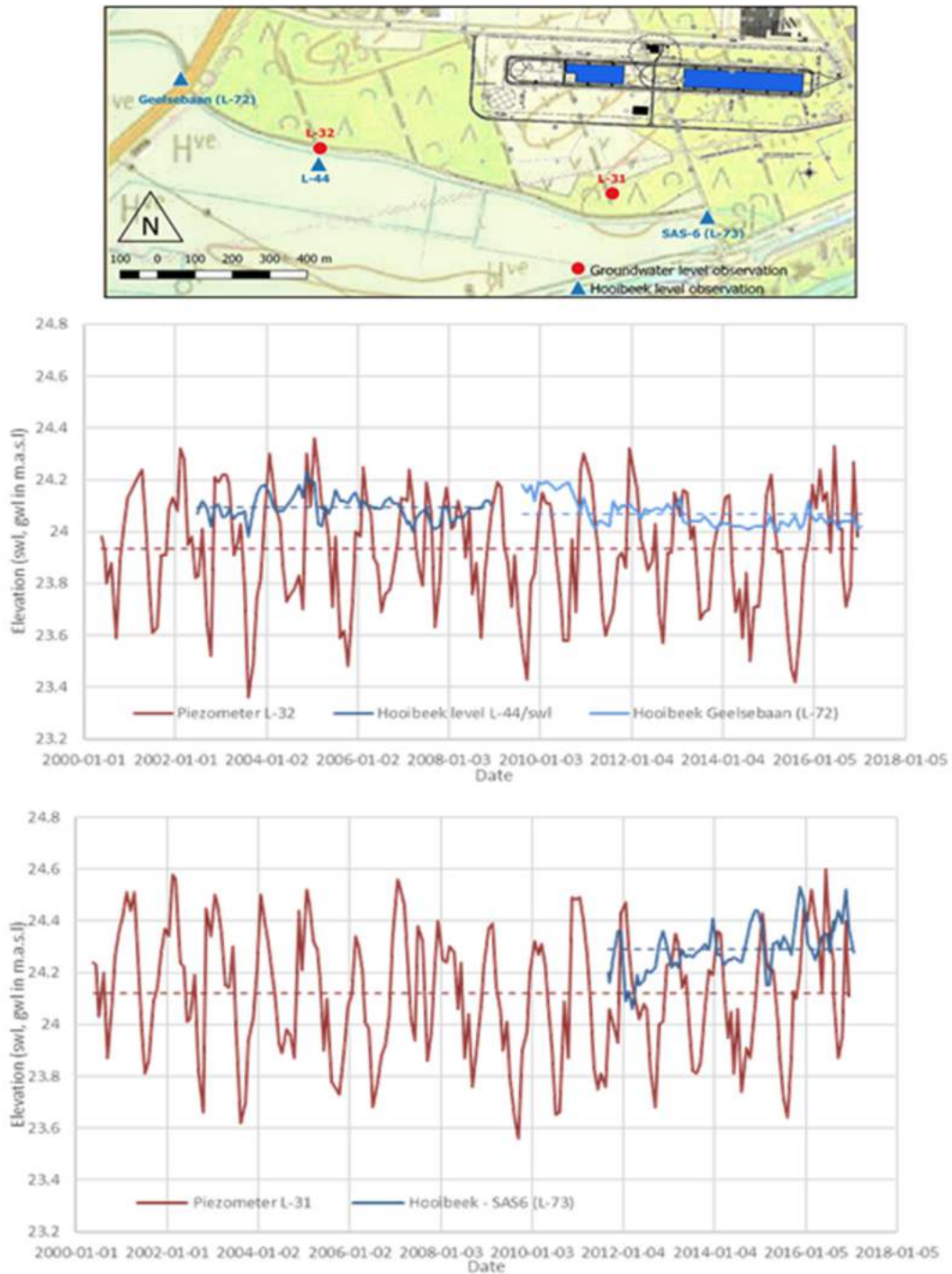
**Figuur 4 - 129: Topografie (zwarte lijn) en simulatieresultaten (steady state stromingsmodel) voor de grondwatertafel in een zuidwest-noordoostprofiel, locatie van het profiel in Figuur 4 - 124. Toekomstig klimaat betreft CCI-HYDR hoog/nat.**

De Hooibeek is een artificieel gevoede beek om water vanuit het kanaal Bocholt-Herentals naar het Prinsenveld te brengen. In het huidige model wordt aan de Hooibeek een lage conductantie toegekend waardoor er weinig contact met het grondwater is. Deze conceptualisering wordt ondersteund door de piëzometrische gegevens die getoond worden in Figuur 4 - 130. Daarin wordt het waterniveau van de Hooibeek en van het nabije grondwater getoond, en zien we dat er geen hydraulisch verband is tussen de beek en het grondwater. De wijzigingen in grondwaterstand zijn namelijk groter dan deze van het waterniveau van de Hooibeek. Bovendien ligt het waterniveau van de Hooibeek meestal hoger dan dat van het grondwater, waardoor er geen drainage van grondwater naar de Hooibeek verwacht wordt. Indien de Hooibeek het grondwater zou voeden, dan zouden de wijzigingen in grondwaterstand nabij de Hooibeek minder groot zijn.

<sup>50</sup> CCI-HYDR voorspelt minder infiltratie dan in het huidige klimaat, zelfs in het “hoog/nat” scenario.

Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel



Figuur 4 - 130: Observaties van het waterpeil in de Hooibeek, alsook de waterpeilen van piezometers dicht bij de Hooibeek (in m TAW). De streeplijnen geven de gemiddelde waarden weer.

De GTF zou ook beïnvloed kunnen worden door de Hooibeek ten zuiden van de bergingsite, indien deze een belangrijke drainage van grondwater zou veroorzaken. Door een simulatie te verrichten met en zonder Hooibeek, is aangetoond dat het weglaten van de Hooibeek in combinatie met het weglaten van het kanaal Bocholt-Herentals, slechts tot een minieme wijziging in GTF ( $<10^{-9}$  a/m<sup>3</sup>) leidt ten opzichte van de situatie waar de Hooibeek niet weggelaten wordt en het kanaal Bocholt-Herentals wel.

#### 4. Zandwinning

De invloed van de verwachte evolutie van zandwinning in de regio werd geëvalueerd in een eerdere herziening van het Lokale model [R4-166]. Er zijn verschillende grote zandputten aanwezig ten oosten van het gebied bestreken door het Lokale grondwatermodel, waarvan sommige nog worden ontgonnen. De zandputten op de grens tussen Mol en Lommel hebben een belangrijke invloed op de lokale hydrogeologie [R4-106]. In Dessel, tegenover de site van Belgoprocess, zou de zandwinning volgens planning lopen tot 2049. Op dat ogenblik zal de maximale grootte van de zandput worden bereikt.

De gevolgen van mogelijke toekomstige effecten van deze putten op de grondwaterniveaus werd onderzocht [R4-166]. Het mogelijks geïmpacteerde gebied (kleine toename van de grondwaterniveaus - Figuur 4 - 131) situeert zich aan de oostgrens van het Lokale grondwatermodel (langs de Witte Nete).

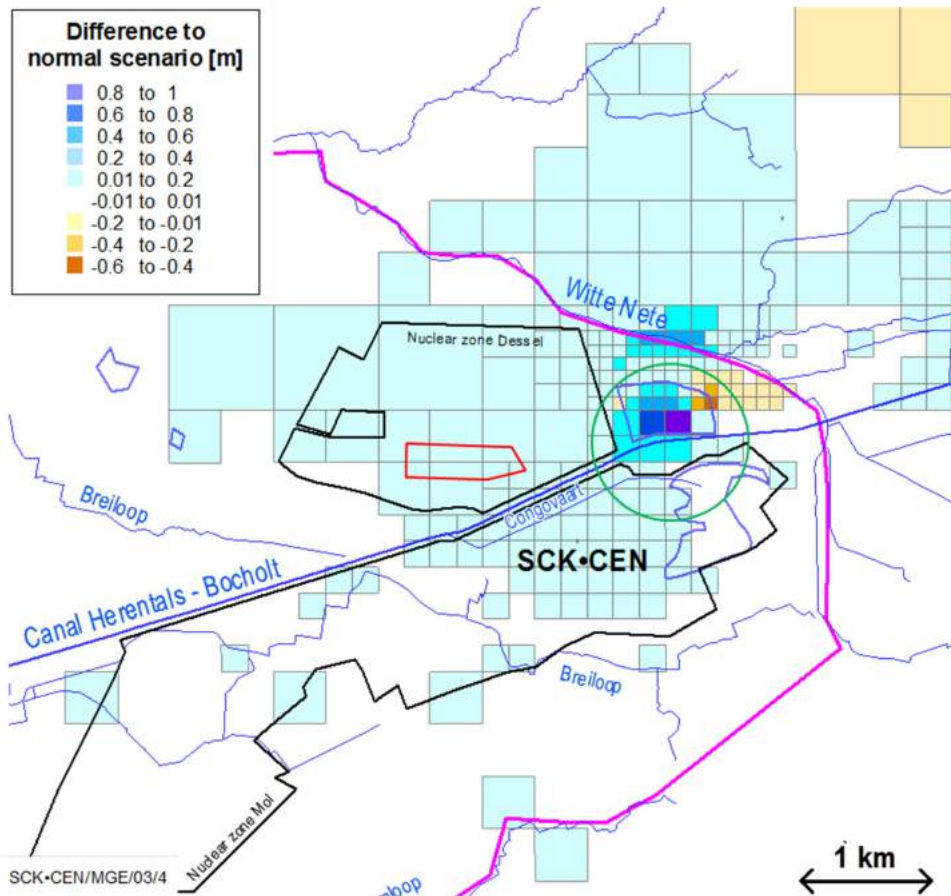
Het is interessant te vermelden dat uit een eerdere milieueffectstudie [R4-106] met een simulatie van de grondwaterstroming voor de maximale grootte van de zandput blijkt dat er geen belangrijke invloed is op de positie waarvoor de randvoorwaarden van ons Lokaal grondwatermodel gedefinieerd worden. De vergelijking tussen het toekomstige grondwatertafelpatroon (in het jaar 2049) en de resultaten van het Lokale grondwatermodel uit 2004 wordt getoond op Figuur 4 - 131. Een afname van het gesimuleerde grondwaterniveau wordt waargenomen op de plaatsen waar de bestaande zandput Mol-Donk zou uitbreiden. Ten noorden van de put werd het tracé van de Witte Nete verlegd in voorbereiding van deze uitbreiding. Naast dit nieuwe tracé werd een maximale verandering (verhoging) in de waterstand van de Witte Nete van 60 cm waargenomen.

Zandwinnings buiten de grenzen van het Lokale model, die zich situeren ter hoogte van de rivieren, hebben geen invloed op de lokale grondwaterstroming aangezien de rivieren de grondwatertafel rond het huidige niveau behouden. Indien men een nieuwe zandput zou openen in het gebied afgedekt door het Lokale model, bijvoorbeeld ten noorden<sup>51</sup> van de bergingsinrichting, zou dit lokaal een drainerend effect hebben met grotere gradiënten en dus een sterkere grondwaterstroming, met als effect een toename van de dilutie (en een verlaging van de GTF).

De zandputten op de grens tussen Mol en Lommel hebben een belangrijke invloed op de lokale hydrogeologie [R4-106]. Daarom werden in [R4-107] de mogelijke toekomstige effecten van de ontginningen op de lokale hydrogeologie onderzocht. Het besluit hierbij is dat het mogelijks geïmpacteerde gebied (wijziging van de grondwaterniveaus) zich situeert aan de oostgrens van het Lokale grondwatermodel (langs de Witte Nete): de verschillen in grondwaterpeil blijven beperkt tot enkele tientallen centimeter (Figuur 4 - 65).

---

<sup>51</sup> Momenteel wordt ervan uitgegaan dat de kwaliteit van de zanden ten westen van de bestaande zandput te laag is, zie ook verder §4.9.4.4



Figuur 4 - 131: Gesimuleerde verschillen in grondwaterstand tussen de huidige en toekomstige situatie (tot 2049) ten gevolge van uitbreiding van de zandwinnig (groene cirkel). Positieve verschillen duiden op een verhoging van de grondwaterstand [R4-107].

#### 5. Toekomstig oppervlaktewater en landschapsarchitectuur

Wanneer het landschap in de toekomst zou worden omgevormd, zal dit gepaard gaan met een demonstratie dat het niveau van langetermijnveiligheid minstens equivalent is met het niveau dat gerealiseerd kan worden op basis van de huidige aannames in het veiligheidsrapport. Op dat ogenblik zal de mogelijke invloed van bijvoorbeeld nieuw gecreëerde oppervlaktewateren op de waterstroming en het radionuclidentransport in de omgeving van de installatie in kaart worden gebracht.

## 6. Conclusies

Samenvattend kan gesteld worden dat, behalve het mogelijke verdwijnen van het kanaal Bocholt-Herentals, slechts een beperkte invloed op de GTF verwacht wordt van andere door mensen teweeggebrachte veranderingen aan de hydrogeologie.

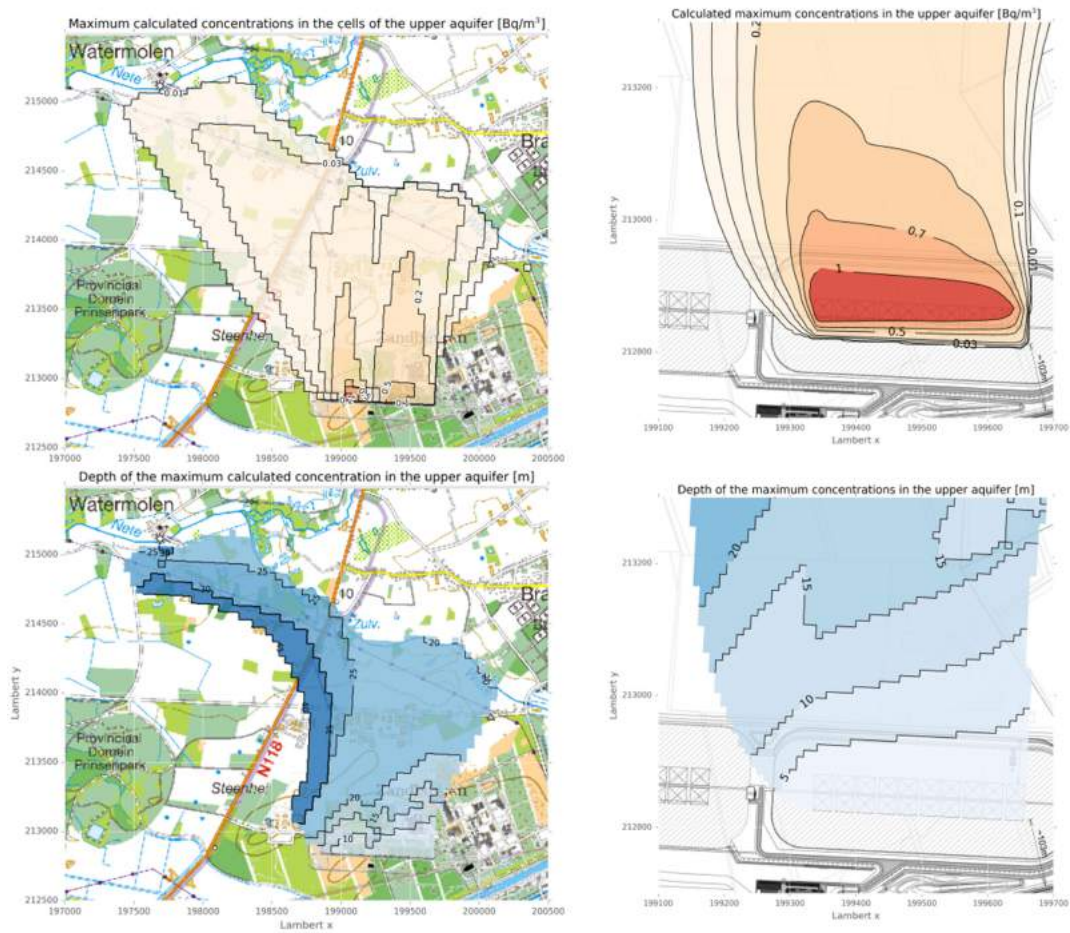
### 4.6.2.8 Mogelijk beïnvloedingsgebied van de contaminatie

De belangrijkste interfaces tussen de geosfeer en de biosfeer zijn een waterput, oppervlaktewaters en kwelgebieden. Vanuit deze interfaces kunnen contaminanten zich verder verspreiden in de biosfeer door natuurlijke transportprocessen (uitgezonderd de waterput) of door tussenkomst van de mens. Hierop wordt meer in detail gegaan in [HS14], §14.4.7 en §14.3.5.1. De positie van deze receptoren wordt bepaald door de omvang van de radionuclidepluim. De omvang van de pluim wordt berekend uitgaande van een conservatieve tracer zonder rekening te houden met eventuele verval- en sorptieprocessen (Figuur 4 - 132).

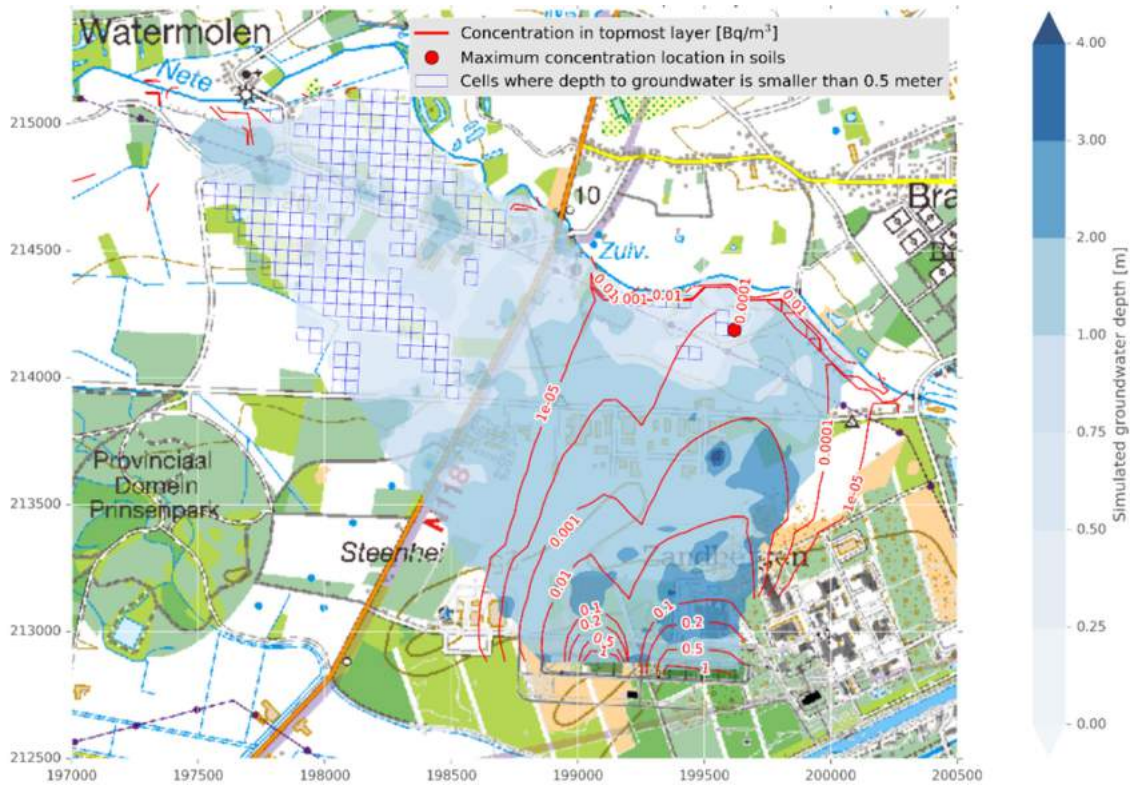
Het beïnvloedingsgebied bevindt zich ten noorden van de bergingsite. Een klein deel van de besmetting dringt via de Kasterlee Klei, die zich op een diepte van een dertigtal meter bevindt, door tot de onderste watervoerende laag, wat resulteert in een afbuiging van de verontreinigingspluim in noordwestelijke richting. Omdat de toekomstige positie van de waterput niet exact gekend is, wordt de meest ongunstige plaats gekozen.

Op basis van het huidige hydrogeologische model kan men algemeen stellen dat de contaminatiepluim neerwaarts migreert nabij de bergingsinrichting (infiltratiegebied), waarna deze horizontaal beweegt in de richting van de waterlopen, vanwaar de pluim opwaarts naar het oppervlaktewater migreert. Zo komt de massastroom die de aquifers binnendringt, uiteindelijk in de rivieren terecht en wordt deze stroom verder in het rivierwater verdund.

De bodems (boven het grondwaterpeil gelegen) kunnen besmet geraken door het opwellende grondwater in de buurt van de rivieren. Deze besmetting kan in de wortelzone van de bodem doordringen door capillaire krachten en/of onder invloed van plantenwortels. Zandgronden tonen weinig capillariteit als gevolg van de grotere poriën tussen de korrels, waardoor er weinig opwaartse stroming van het grondwater ontstaat in het bodemprofiel. Dat is de reden waarom deze gronden snel opdrogen na een natte periode. Enkel wanneer het grondwater zich echt ondiep bevindt, dus minder dan 50 cm onder het maaiveld, is er door capillariteit mogelijkheid tot bodembevochtiging. Grondwater uit de bovenste watervoerende laag heeft slechts af en toe direct contact met de bovenste bodemlagen. Opwelling van grondwater kan dus, in eerste instantie, de wortelzone van de bodem verontreinigen (optredend als biosfeer-receptor) en de besmetting zal verder worden verspreid naar andere componenten van de biosfeer. Een mogelijke manier om drassige gebieden af te bakenen is door het bepalen van gebieden waar het grondwater zich maximaal 1 m onder het maaiveld bevindt, rekening houdend met het effect van de wortelzone, capillaire opstijging, het verschil tussen de grondwaterstand in de zomer en in de winter en het effect van de evapotranspiratie. De gesimuleerde diepte van het grondwater is gegeven in Figuur 4 - 133. Locaties met een zeer ondiepe grondwaterstand (tussen 0 en 0,5 m) zijn meestal gelegen nabij de samenvloeiing van de Witte en Kleine Nete.



Figuur 4 - 132: Concentraties (Bq/m<sup>3</sup>) berekend door het radiologische impact- en veiligheidsbeoordelings-model. Links: resultaten van het *intermediate scale* model. Rechts: resultaten van het gedetailleerde model voor de oostelijke tumulus (westelijke tumulus dient nog gevalideerd te worden). De bovenste kaarten tonen de maximale concentraties in de bovenste aquifer (boven de Kasterlee Klei). De onderste kaarten tonen de dieptes op dewelke deze concentraties worden bereikt. De pluimen zijn enkel weergegeven voor de waarden > 0,01 Bq/m<sup>3</sup>, gebaseerd op een bronflux van 1 Bq/m<sup>2</sup>/a.



Figuur 4 - 133: Diepte van de grondwatertafel [m] in de buurt van de bergingsinrichting voor de zone met de contaminatiepluim, en de modelcellen waar het grondwater minder diep staat dan 0,5 m. Hier wordt de contaminatiepluim gegeven voor het huidige klimaat. Voor het toekomstige klimaat wordt een verlaging van de grondwatertafel verwacht, en dus een minder groot beïnvloedingsgebied van contaminatie dan wat er hier weergegeven is.

#### 4.6.2.9 Waterbalans

##### 4.6.2.9.1 Geschatte termen van de waterbalans in het Netebekken

De waterbalansvergelijking voor een gegeven bekken met een vrije watertafel kan vereenvoudigd weergegeven worden als:

$$P - ET - I_d - D - A = \Delta S$$

met  $P$ : neerslag;  $ET$ : actuele evapotranspiratie;  $I_d$ : infiltratie naar de diepere aquifers;  $D$ : uitstroom uit het stroomgebied;  $A$ : opgepompt debiet uit de aquifer en  $\Delta S$  de verandering in bergingscoëfficiënt in het Netebekken<sup>52</sup>.

<sup>52</sup> Een onverstoord hydrologisch systeem zal over een voldoende lange termijn beschouwd een evenwichtssituatie vertonen, met andere woorden  $\Delta S = 0$

Voor de waterbalans op niveau van het Netebekken beschouwen we  $I_d = 0$  en  $\Delta S = 0$ . De termen  $P$  en  $ET$  werden behandeld in §4.6.2.1. De termen  $A$  en  $D$  worden hieronder geschat. Daarna wordt de globale waterbalans in het Netebekken gegeven.

De waterbalans in het Netebekken wordt gebruikt om na te gaan of de schattingen van de parameters neerslag, infiltratie, evapotranspiratie, afpompings en basisafvoer door rivieren onderling coherent zijn.

#### Afpomping (A)

Figuur 4 - 134 en Tabel 4 - 60 tonen de evolutie in de tijd van de vergunde grondwaterwinningen voor het gebied van de Netebekken volgens de databank van de Vlaamse Milieumaatschappij. Het overgrote deel van het water wordt gepompt uit de Mioceen aquifer (HCOV 0250, ongeveer 80%), uit de Quartaire aquifersystemen wordt ongeveer 13% gepompt.

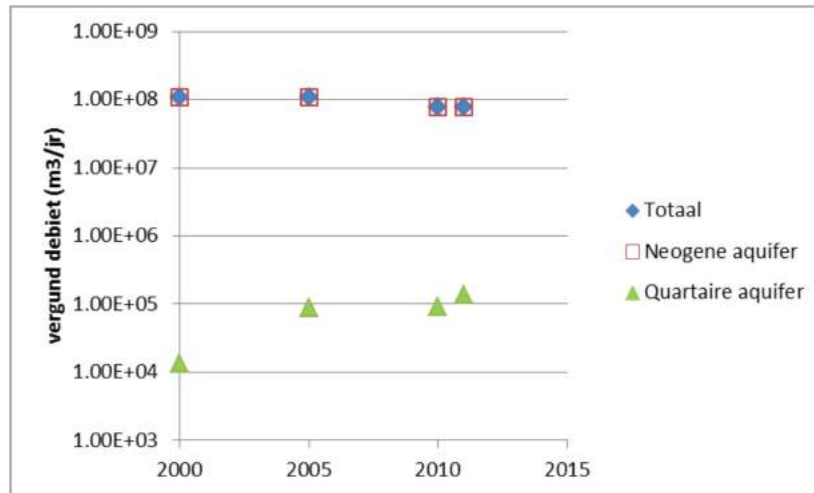
Het totaal vergunde debiet voor het Netebekken is tussen 2000 en 2011 met ongeveer 28% gedaald (Figuur 4 - 134 en Tabel 4 - 60). Figuur 4 - 134 geeft ook de evolutie in de vergunde afpompingen weer voor de Neogeen en Quartaire aquifersystemen. Er is weliswaar een grote stijging te zien van onttrekkingen uit het Quartaire aquifersysteem, met een stijging van 90% van 2000 tot 2011, maar uit deze aquifer wordt veel minder gepompt dan uit de Neogeen aquifer. Het vergunde opgepompte debiet uit de Neogeen aquifer is met ongeveer 28% gedaald tussen 2000 en 2011. Door de VMM werd een niet-gepubliceerde studie uitgevoerd naar het verband tussen het vergunde debiet en het werkelijk opgepompte debiet [R4-167]. Hieruit blijkt dat het werkelijk opgepompte debiet voor ondiepe aquifers gelijk is aan 60 tot 70% van het vergunde debiet.

Indien men een werkelijk opgepompt debiet veronderstelt van 65% van een totaal vergund debiet van ongeveer  $7,8 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ , en dit converteert naar mm/a (met een oppervlakte van  $1\,543 \text{ km}^2$  voor het Netebekken), dan bedraagt de afpompings in het Netebekken ongeveer 33 mm/a. Indien men het effectief opgepompt debiet laat variëren tussen 60 en 70%, dan bedraagt de onzekerheid op de afpompings  $\pm 3 \text{ mm/a}$ .

**Tabel 4 - 60: Evolutie van het totaal vergunde opgepompte debiet voor het Netebekken (NAM model).**

Jaartal	totaal vergunde debiet (m <sup>3</sup> /a)
2000	$1,08 \times 10^8$
2005	$1,08 \times 10^8$
2010	$7,79 \times 10^7$
2011	$7,79 \times 10^7$





Figuur 4 - 134: Evolutie van het vergunde afgepompte debiet (m³/a) voor de Netebekken (periode 2000 – 2011).

#### Basisafvoer door rivieren (D)

De uitstroom uit het stroomgebied kan worden geschat gebruikmakend van de observaties van het VMM-netwerk [R4-105]. De volledige meetreeksen van debieten (dagwaarden) voor vier stations in het Netebekken werden hiervoor gebruikt (locatie meetstations in Figuur 4 - 135).

In Tabel 4 - 61 wordt de basisafvoer weergegeven ter hoogte van vier stations op Grote en Kleine Nete voor de periode 1988 – 2010. De basisafvoer werd berekend met het algoritme PART [R4-168]. Het algoritme lokaliseert lage waarden van de afvoer in de gemeten afvoerreeks en interpoleert dagwaarden van de gemeten afvoer tussen deze lage waarden.

In Tabel 4 - 61 wordt ook de 'baseflow index' (BFI) gegeven en de specifieke basisafvoer. De BFI geeft het procentuele aandeel weer van de basisafvoer ten opzichte van de totale afvoer. De specifieke basisafvoer geeft de basisafvoer weer per eenheid van oppervlakte. Uit de gegevens kunnen twee trends worden afleid:

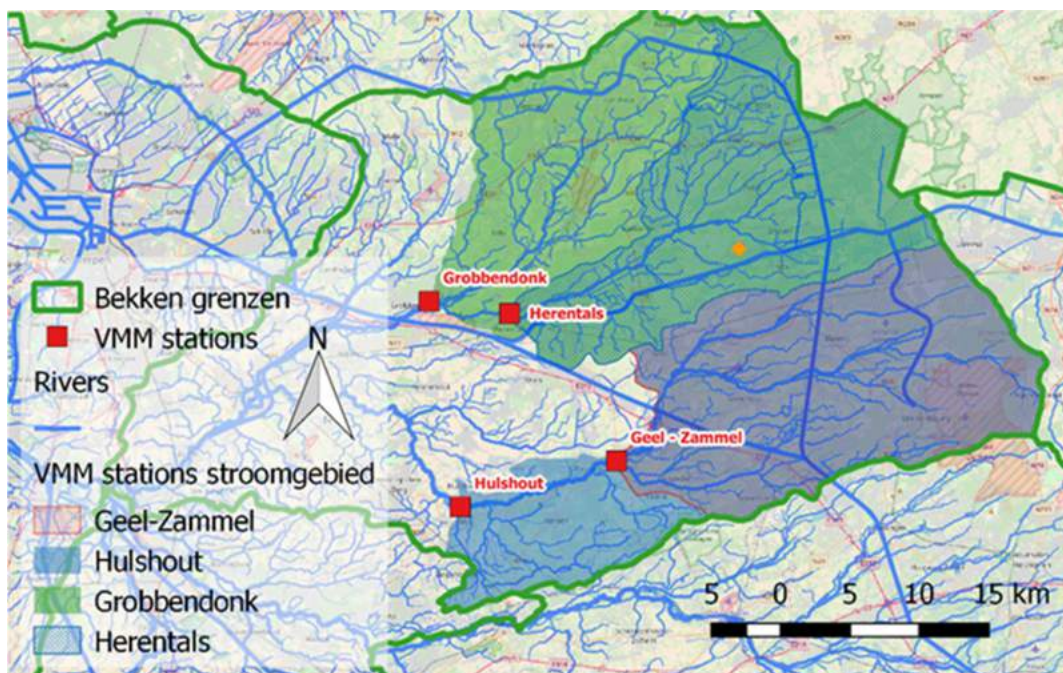
- Grote Nete versus Kleine Nete: in het stroomgebied van de Grote Nete vinden we hogere waarden voor de BFI dan in het stroomgebied van de Kleine Nete. Met andere woorden het aandeel van de basisafvoer in de totale afvoer is in het stroomgebied van de Grote Nete groter dan in het stroomgebied van de Kleine Nete.
- Opwaartse versus afwaartse gebieden: opwaartse gebieden worden gekenmerkt door een hogere waarde van specifieke basisafvoer en een hogere BFI (hoger aandeel van basisafvoer in de totale afvoer) in vergelijking met afwaartse gebieden. Dit wordt verklaard doordat de run-off toeneemt naar het westen (ten gevolge van verstedelijking en een ondiepere grondwatertafel). Dit fenomeen is meer uitgesproken voor de stations op de Kleine Nete dan voor de stations op de Grote Nete. Het gevolg is dat voorzichtigheid geboden is bij het herschalen van basisafvoer en run-off van kleine naar grote stroomgebieden en omgekeerd.

Tabel 4 - 61: Geschatte basisafvoer voor 4 stations op Grote en Kleine Nete voor de periode 1988 – 2010, samen met de *baseflow index* (BFI) en de specifieke basisafvoer in L/s/km<sup>2</sup> (de basisafvoer per eenheid van oppervlakte) [R4-105]. Locatie van de stations in Figuur 4 - 135.

Naam station	Oppervlakte stroomgebied (km <sup>2</sup> )	Afvoer (op daggemiddelden) (m <sup>3</sup> /s)	Berekende basisafvoer (op daggemiddelden) (m <sup>3</sup> /s)	Baseflow index (%)	Specifieke basisafvoer (L/s/km <sup>2</sup> )
Grote Nete - Hulshout	443,55	4,93	4,15	84,1	9,36
Grote Nete - Geel	385,7		3,64	86,1	9,44
Kleine Nete - Grobbendonk	590	6,80	5,24	77,1	8,88
Kleine Nete - Herentals	338,6		3,53	81,4	10,43

De meest relevante gegevens worden bekomen van de stations Grobbendonk (Kleine Nete) en Hulshout (Grote Nete), die verder worden geëxtrapoleerd voor het hele Netebekken. Gebruikmakend van de gegevens van de subbekkens van de Grote Nete te Hulshout en de Kleine Nete te Grobbendonk door ze te converteren in mm/a, wordt de uitstroom D geschat: D = 363 mm/a voor de Kleine Nete en 350 mm/a voor de Grote Nete, dus een gemiddelde van 357 mm/a voor het volledige Netebekken.

De onzekerheid op D wordt in hoofdzaak veroorzaakt door de conversie van de rivierniveaus naar uitstroomgegevens (QH relatie, zie ook §0). Indien een onzekerheid van 10% verondersteld wordt voor ieder station, varieert D tussen 321 en 393 mm/a. De onzekerheid op D kan dus geschat worden als 357 mm/a ± 40 mm/a.



Figuur 4 - 135: Positie van de VMM stations en hun stroomgebieden in het Netebekken. Locatie van de site is aangegeven met een gele ruit.

#### 4.6.2.9.2 Waterbalans in het Netebekken

De verschillende termen van de waterbalans in het Netebekken worden in Tabel 4 - 62 gegeven. Daaruit volgt dat er slechts een afwijking van ongeveer 10 mm/a zit op de globale waterbalans voor het Netebekken, waardoor geconcludeerd wordt dat de schattingen van de verschillende termen in deze balans coherent zijn met elkaar.

Tabel 4 - 62: Waterbalans in het Netebekken

	$P - ET - I_d - D - A - \Delta S = \text{afwijking op de waterbalans (10 mm/a)}$					
	<i>P</i> neerslag (mm/a)	<i>ET</i> actuele evapotranspiratie (mm/a)	<i>I<sub>d</sub></i> infiltratie naar diepere aquifers (mm/a)	<i>D</i> uitstroom (mm/a)	<i>A</i> afpompings (mm/a)	$\Delta S$ verandering in bergingscoëfficiënt (mm/a)
Beste schatting	890	490	0	357	33	0
Laagste waarde	880	410		321	30	
Hoogste waarde	900	570		393	36	

#### 4.6.2.9.3 Waterbalans berekend door het Lokale grondwatermodel

De uitstroom door de rivieren berekend door het Lokale grondwatermodel wordt vergeleken met de gegevens voor de basisafvoer door rivieren om na te gaan dat door het Lokale model die component van de waterbalans goed wordt geschat.

Voor het gedeelte van het model dat afwatert naar de Kleine Nete (49,66 km<sup>2</sup>; Figuur 4 - 136) werd de uitstroom naar de Kleine Nete berekend aan de hand van de resultaten van het Lokale grondwatermodel (0,492 m<sup>3</sup>/s<sup>53</sup>). Vervolgens werd dit resultaat vergeleken met de basisafvoer op de Kleine Nete te Herentals (zie Tabel 4 - 61) die herschaald werd naar de oppervlakte van het Lokale model dat naar de Kleine Nete afvoert (49,66 km<sup>2</sup> × 10,43 L/(s.km<sup>2</sup>)). De resultaten geven een zeer goede overeenkomst tussen die van het hydrogeologische model en de berekende basisafvoer: 0,492 m<sup>3</sup>/s en 0,518 m<sup>3</sup>/s respectievelijk.

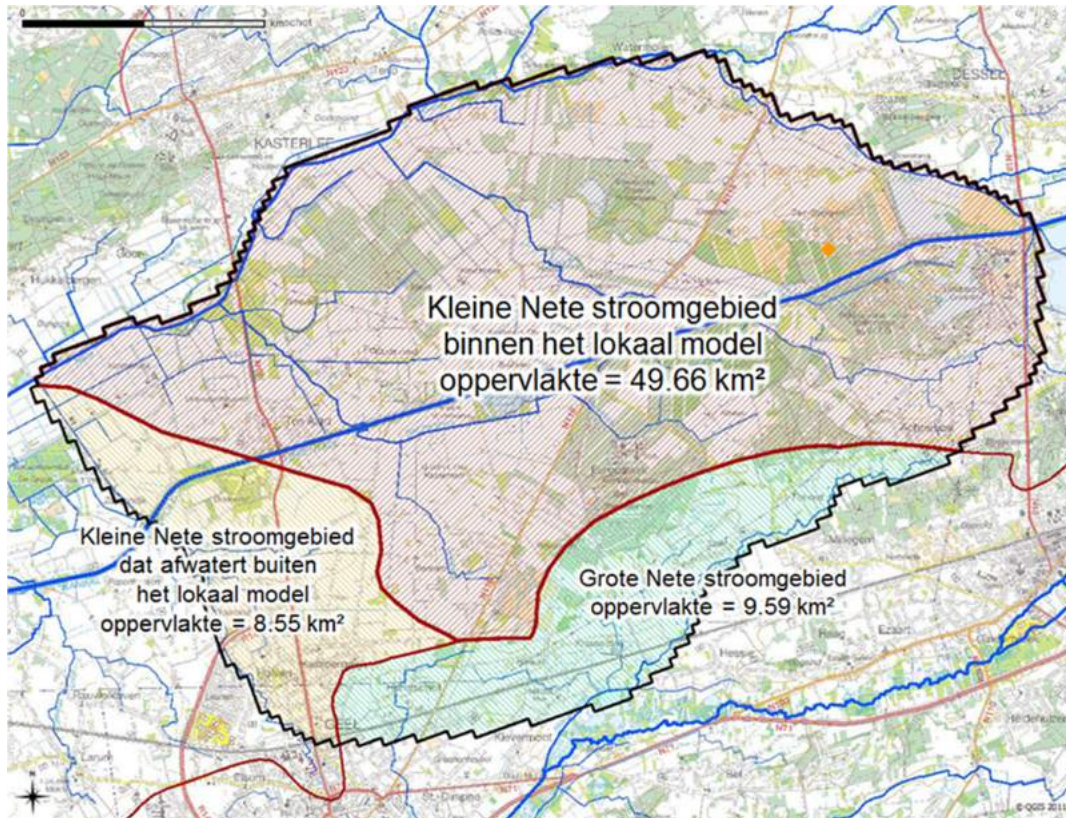
De globale waterbalans in het Lokale grondwatermodel is:

$$I - D - I_d - A = \Delta S$$

met *I* de infiltratie naar het grondwater (met  $I = P - ET$ , zie vergelijking in §4.6.2.9.1), *D* de grondwaterafvoer naar oppervlaktewater (uitstroom), *I<sub>d</sub>* de infiltratie naar de diepere aquifers, *A* het opgepompte debiet uit de aquifer en  $\Delta S$  de verandering in bergingscoëfficiënt van de Neogene aquifer<sup>54</sup>.

<sup>53</sup> Instroom via rivieren en via drains.

<sup>54</sup> Een onverstoord hydrologisch systeem zal over een voldoende lange termijn beschouwd, een evenwichtssituatie vertonen, m.a.w.  $\Delta S = 0$



**Figuur 4 - 136: Situering van het Lokale grondwatermodel (binnen de zwarte lijn). Het deelstroomgebied dat afwatert naar de Kleine Nete is in het rood gearceerd (aangepast aan [R4-107]). Locatie van de site is weergegeven met een gele ruit.**

Verder kan D voor het Lokale grondwatermodel in meer detail gedefinieerd worden:

$$D = D_r + D_d + D_c + D_l + D_{gw_i}$$

met  $D_r$ : uitstroom naar rivieren;  $D_d$ : uitstroom naar drains (grachten);  $D_c$ : uitstroom naar kanalen;  $D_l$ : uitstroom naar meren;  $D_{gw_i}$ : uitstroom naar andere gebieden. In deze vergelijking wordt met de uitstroom naar andere gebieden de uitstroom uit het model via de randvoorwaarde van vaste stijghoogte bedoeld.

De lokale waterbalans werd berekend voor het deelstroomgebied dat naar de Kleine Nete afwatert binnen het Lokale model (Figuur 4 - 136), en dit met het Lokale grondwatermodel uit (§3.1.2 van [OD-026]). Het Lokale hydrogeologische model is voor het grootste deel in het stroomgebied van de Kleine Nete gelegen en voor een klein deel in het stroomgebied van de Grote Nete. In Tabel 4 - 63 wordt de waterbalans gegeven voor het volledige Lokale model en voor het gedeelte van het model dat afwatert naar de Kleine Nete binnen het Lokale model (ongeveer 83 % van het 60 km<sup>2</sup> grote modelgebied). De infiltratie werd bepaald uitgaande van een simulatie met HYDRUS 1D (beste schatting uit §4.6.2.1). Verder is in het Lokale model de afpompings gelijk aan nul ondersteld. Voor het volledige Lokale model zien we dat meer dan 100% van het geïnfilteerde water afgevoerd wordt via rivieren en drains, dat 15% van het grondwater afkomstig is van het kanaal, dat 13% in de

meren stroomt en dat 3% van het water toevloet in het model via de randvoorwaarde van constante stijghoogte. Voor het stroomgebied dat binnen het lokale model afwatert naar de Kleine Nete wordt een kleiner deel van het geïnfiltreerde water afgevoerd naar rivieren en drains (92 %). De voornaamste reden hiervoor is dat er nu 8% van het grondwater uit het model stroomt via de randvoorwaarde van constante stijghoogte.

**Tabel 4 - 63: Lokale waterbalans voor het volledige lokale model en voor het gedeelte van het lokale model dat binnen het lokale model afwatert naar het stroomgebied van de Kleine Nete [OD-026].**

	Infiltratie (mm/a)	Uitstroom naar rivieren (%)	Uitstroom naar drains (%)	Uitstroom naar meren (%)	Uitstroom naar kanalen (%)	Uitstroom naar andere gebieden (%)
<b>Volledige model</b>	306	63,98	39,76	13,32	-15,30	-3,27
<b>Deel Kleine Nete</b>	306	55,54	37,12	9,92	-11,79	8,62

#### 4.6.3 Conclusies

De grondwatertafel op de site schommelt tussen 1 à 2 m onder het maaiveld en bereikt dus het maaiveld niet.

Er is geen historisch bewijs van overstromingen op de bergingsite en de lokale topografie zal een mogelijke overstroming van de site zelf afzwakken. Een gedetailleerde evaluatie van het overstromingsrisico uitgevoerd met een speciaal ontwikkeld hydrologisch model voor de regio (zie §0 en [OD-084]) bevestigt dat het maximale overstromingsniveau voor neerslaggebeurtenissen met een waarschijnlijkheid van  $10^{-7}$ /jaar ongeveer 24,8 mTAW bedraagt, en in het geval van een dijkdoorbraak aan het kanaal Bocholt-Herentals ongeveer 25,2 mTAW. De bergingsinstallatie bevindt zich ruim boven deze niveaus.

Gezien 1) de zeer goede overeenkomsten tussen de richting van de gemiddelde stromingsvectoren voor de volledige periode 2001-2016 en de stromingsvectoren bepaald aan de hand van het lokaal grondwatermodel, en 2) de goede overeenkomsten tussen de geschatte stroomsnelheden op basis van de hydraulische gradiënt, de resultaten van de dilutietesten, en de stroomsnelheden uit het lokaal grondwatermodel, kan er gesteld worden dat de stroomsnelheid en – richting voldoende bevestigd zijn teneinde de afleiding van de geotransferfactor voor de onmiddellijke omgeving rond de oostelijke tumulus te kunnen maken met behulp van het model. Aangezien een beperkte overschatting van de stroomsnelheid niet kan uitgesloten worden, zal tegen de tweede Wetenschappelijke Raad een aangepast hydrogeologisch model gemaakt worden dat rekening houdt met het geheel van de meetresultaten waaruit de nieuwe geotransferfactor voor de oostelijke tumulus afgeleid zal worden. Ten tijde van de metingen om de stroomrichting en –snelheid te bepalen, werd het stromingspatroon van het grondwater in de omgeving van de westelijke tumulus verstoord door een retourbemaling bij FBFC International. Daarom zijn er nog geen resultaten voor de westelijke tumulus in dit hoofdstuk opgenomen. Bij stopzetting van de bemalingsactiviteiten zullen de nodige stijghoogtemetingen en dilutietests worden uitgevoerd rond de toekomstige locatie van de westelijke tumulus om richting en snelheid van het grondwater daar te bepalen en te toetsen aan die van het Lokaal grondwatermodel.

## 4.7 Geotechnische karakteristieken

### 4.7.1 Context

#### 4.7.1.1 Doelstelling

De geotechnische karakteristieken van de ondergrond van de site zijn een belangrijke factor in het ontwerp van de bergingsinstallatie. In eerste instantie bepalen zij de draagkracht van de ondergrond, samen met de eigenschappen van de onderlaag (i.e. grindlaag, zand-cement en zand-bentoniet ophoging) van de bergingsinstallatie. Dit is een essentiële parameter aangezien de hoge belasting ten gevolge van de berging een aanzienlijke draagkracht vergt. Vervolgens hebben ook de zettingen die optreden ten gevolge van het gewicht van de bergingsinstallatie, en die in directe relatie staan tot de geotechnische karakteristieken van de ondergrond, een grote invloed op het ontwerp van de installatie. Immers, de werking van verschillende componenten, zoals de rolbrug en het drainagesysteem, is zeer gevoelig aan differentiële zettingen.

Het is fundamenteel om een zeer grondige kennis van de geotechnische parameters te vergaren. Daarenboven is een gedetailleerde evaluatie van de draagkracht en vooral van de zettingen noodzakelijk. Ook de invloed van seismische belastingen dient nagegaan te worden, waarbij de mogelijkheid tot liquefactie<sup>55</sup> en dynamische zettingen onderzocht worden. Deze aspecten worden besproken in [HS08] §8.3.3.3 van het veiligheidsdossier.

#### 4.7.1.2 Historiek

Om inzicht te krijgen in de geotechnische karakteristieken werd een trapsgewijze aanpak gevolgd, die zich vertaalt in meerdere terreinverkenningcampagnes (§2 van [R4-219]). Wegens het belang van deze parameters in het ontwerp van de installatie en wegens de strikte veiligheidseisen voor de berging, werden in de loop van de jaren extra inspanningen geleverd op het gebied van de geotechniek. Volgende stappen werden doorlopen:

- **Bibliografische studie van 1999:** In deze studie werd in de eerste plaats nagegaan in welke mate één of meer werkzones binnen het gebied Mol-Dessel voor vestiging van kerninstallaties voldoen aan de vereisten “beschikbaarheid van terrein” en “veiligheidsgebonden indicatoren”. Deze laatste zijn het risico voor overstromingen, de grondmechanische stabiliteit, de seismische activiteit, het voorkomen van minerale rijkdommen en de kennis van de hydrogeologie. Hieruit bleek dat bijkomende terreinverkenningen en studies nodig waren om de geomechanische en hydrogeologische geschiktheid van de zone beter te beoordelen.
- **De terreinverkenningen van 1999:** De eerste aanvullende terreinverkenningen hadden tot doel enerzijds de geologische opbouw en daaruit voortvloeiende grondmechanische stabiliteit te bepalen en anderzijds meer kennis te verwerven over de lokale hydrogeologische situatie. De verkenningen bestonden uit een reeks boringen, diepsonderingen (*Cone Penetration Tests* of CPT's) en een zelfborende pressiometerproef uitgevoerd ten zuiden van het kanaal.
- **Analytische zettingsberekeningen:** Op basis van de gegevens van de eerste geotechnische campagne en het bestaande generiek voorontwerp van de bergingsinstallatie, werd een analytische geotechnische studie uitgevoerd [R4-169]. Daaruit bleek dat maximale absolute zettingen tot 40 cm mogelijk waren.

---

<sup>55</sup> Het verschijnsel waarbij de bodem een aanzienlijk verlies van sterkte en samenhang ondervindt in reactie op een toegebrachte spanning, gewoonlijk door een aardbeving, en zich hierdoor als een vloeistof gaat gedragen.

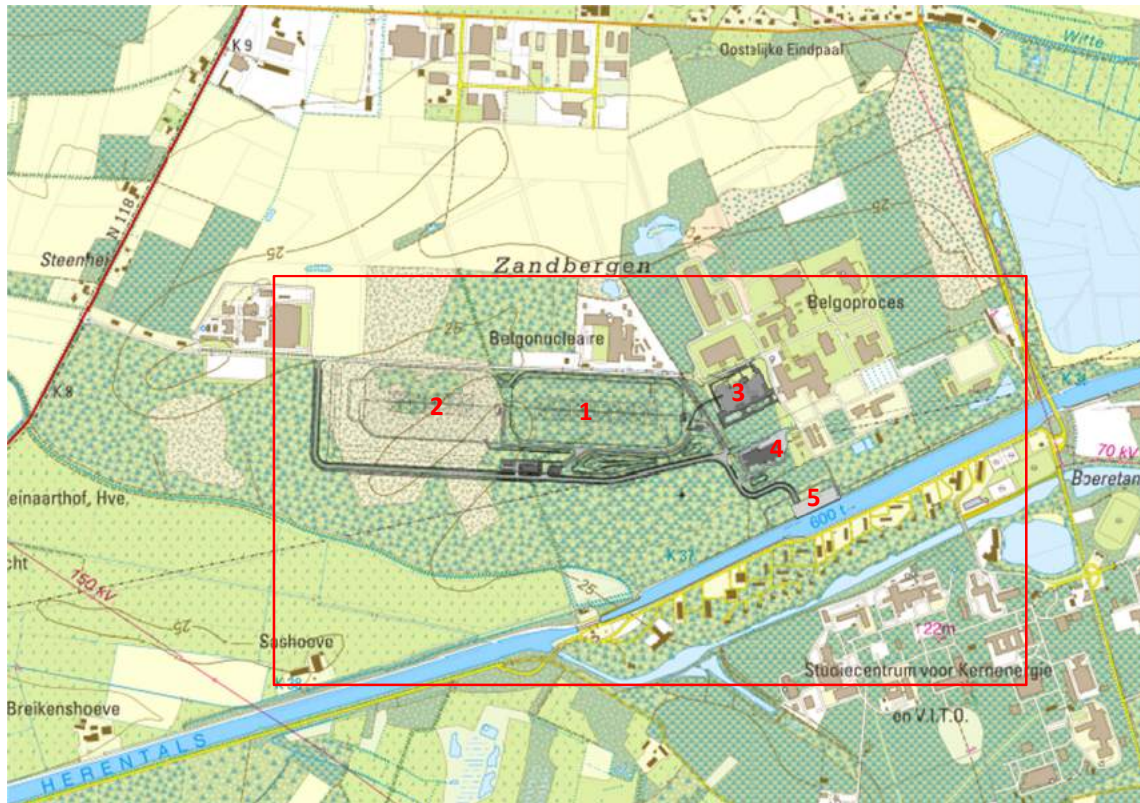
- **De terreinverkenningen van 2002:** Het aanvullend grondonderzoek had tot doel bijkomende informatie te verwerven over de ondiepe ondergrond en de hydrogeologische opbouw van de nucleaire site Mol/Dessel/Geel, voornamelijk ten noorden van het kanaal. Hierbij werd in het bijzonder getracht extra informatie te krijgen over de aanwezigheid van een kleiige overgangslaag tussen de Formaties van Kasterlee en Diest. Vervolgens werd ook meer kennis verzameld over de geotechnische eigenschappen van de ondergrond aan de hand van CPT's, boringen, pressiometer- en laboratoriumproeven.
- **3D zettingsberekening met eindige differentie software FLAC3D:** In deze berekeningen werden de zettingen van de bergingsinstallatie bepaald gedurende de verschillende constructiefasen en exploitatiefasen aan de hand van een driedimensionaal model met de eindige differenties software FLAC3D. Met de parameters die op een conservatieve manier bepaald werden uit de beschikbare gegevens van de terreincampagnes, werden absolute zettingen van ongeveer 42 cm berekend, een overschatting van de werkelijke zettingen [OD-120].
- **De terreinverkenningen van 2008:** Bij het uitvoeren van deze campagne was de locatie van de oppervlakteberging bekend, en werden daarom specifiek op die plaats bijkomende terrein- en laboratoriumproeven gedaan [R4-219]. Door het gebruik van een ander type conus bereikten de CPT's een grotere diepte, wat een completere evaluatie van alle ondergrondse lagen tot aan de top van de Diest Fm toeliet.
- **Geotechnische campagne in 2010:** Deze terreincampagne bestond uit twee series van proeven. Een eerste serie omvatte een groot aantal CPT's uitgevoerd volgens een regelmatig patroon op de locatie van de eerste tumulus om de ruimtelijke continuïteit in de geotechnische karakterisering te verifiëren. De tweede serie kwam overeen met een aantal terreinproeven uitgevoerd op het terrein van de zettingsproef en van het toekomstige IPM gebouw.
- **Zettingsproef:** Hoewel de voorgaande terreincampagnes een grote hoeveelheid aan invoergegevens voor de geotechnische berekeningen beschikbaar maken, moet er rekening gehouden worden met het feit dat klassieke zettingsberekeningen de werkelijke zettingen overschatten. Om het werkelijke zettingsgedrag van de ondergrond op de bergingsite te testen werd een grootschalige testopstelling voorzien. Deze zettingsproef bestond uit een volledig geïnstrumenteerde zandophoging die de belastingssituatie van één gevulde module simuleert. Het doel was een nauwkeurige validatie van de geotechnische karakteristieken te verkrijgen door een terugkoppeling tussen de proefresultaten en de 3D model resultaten.
- **Finale 3D zettingsberekening met eindige elementen software Plaxis 3D:** Deze zettingsberekening maakt gebruik van alle beschikbare geotechnische gegevens en werd uitgevoerd voor de uiteindelijke geometrie en het effectieve belastingsschema van de berging. In het bijzonder de gegevens van de zettingsproef waren hier van belang, aangezien deze het werkelijke zettingsgedrag op de site weergeven (§4.1 van [OD-120]).

## 4.7.2 Geotechnische aspecten

### 4.7.2.1 Omvang van de beschouwde zone

De geotechnische karakteristieken die hier besproken worden, hebben betrekking op de installaties en zijn dus beperkt tot de bergingsite. Dit omvat ook de zone van de IPM, de caissonfabriek en de kade, aangezien deze componenten zich vlak naast de eigenlijke berging bevinden. De beschouwde zone is aangeduid op Figuur 4 - 137.

De zettingsberekeningen zijn uitgevoerd voor de oostelijke tumulus. Deze bestaat uit meer bergingsmodules dan de westelijke tumulus en zal bijgevolg meer zettingen vertonen. Aan de hand van het gebruikte 3D model wordt nagegaan wat de invloedzone is van de eerste tumulus.



Figuur 4 - 137: Beschouwde zone (rode rechthoek) wat betreft de geotechnische karakteristieken. 1: oostelijke tumulus; 2: westelijke tumulus; 3: zone van de IPM; 4: zone van de caissonfabriek en 5: zone van de kade.

### 4.7.2.2 Classificatie van de ondergrond

De ondergrond ter hoogte van de bergingsite bestaat, althans wat betreft de diepte die relevant is voor de verificatie van de stabiliteit van de installaties, voornamelijk uit zandlagen. Enkel op de overgang tussen de Kasterlee en Diest Formaties wordt een kleiige laag aangetroffen.



De karakterisatie van de ondergrond van de bergingsite gebeurde op basis van een groot aantal proeven, verdeeld over meerdere geotechnische campagnes zoals aangehaald in §4.7.1.2. CPT's maken een belangrijk deel uit van deze proeven, maar rekening houdend met de omvang en de eigenschappen van het project, werden de sondeercampagnes aangevuld met andere proeven, zowel *in situ* als in het laboratorium. CPT's laten toe om op één punt op het terrein een beeld te verkrijgen van de ondergrond, door met een klein meetinterval (typisch om de 2 cm) de conusweerstand en wrijvingsweerstand op te meten van een stang die in de grond wordt geduwd. De meetreeks bestaande uit deze twee waarden in functie van de diepte, laat toe de ondergrond op te delen in verschillende lagen met een zekere laagdikte en aan elke laag een grondsoort, bijmenging en pakkingsdichtheid toe te kennen (bijvoorbeeld "dicht kleihoudend zand"). Daarnaast kunnen aan de hand van correlatietabellen (zoals deze in de Nationale Bijlage aan Eurocode 7, [R4-170]) karakteristieke waarden voor de belangrijkste grondparameters (densiteit, cohesie, wrijvingshoek) gedefinieerd worden uitgaande van de gemeten conusweerstand ( $q_c$ ) en het wrijvingsgetal ( $R_f$ )<sup>56</sup>. Door het uitvoeren van meerdere CPT's op dezelfde site, wordt bovendien een idee verkregen van de variabiliteit van de ondergrond.

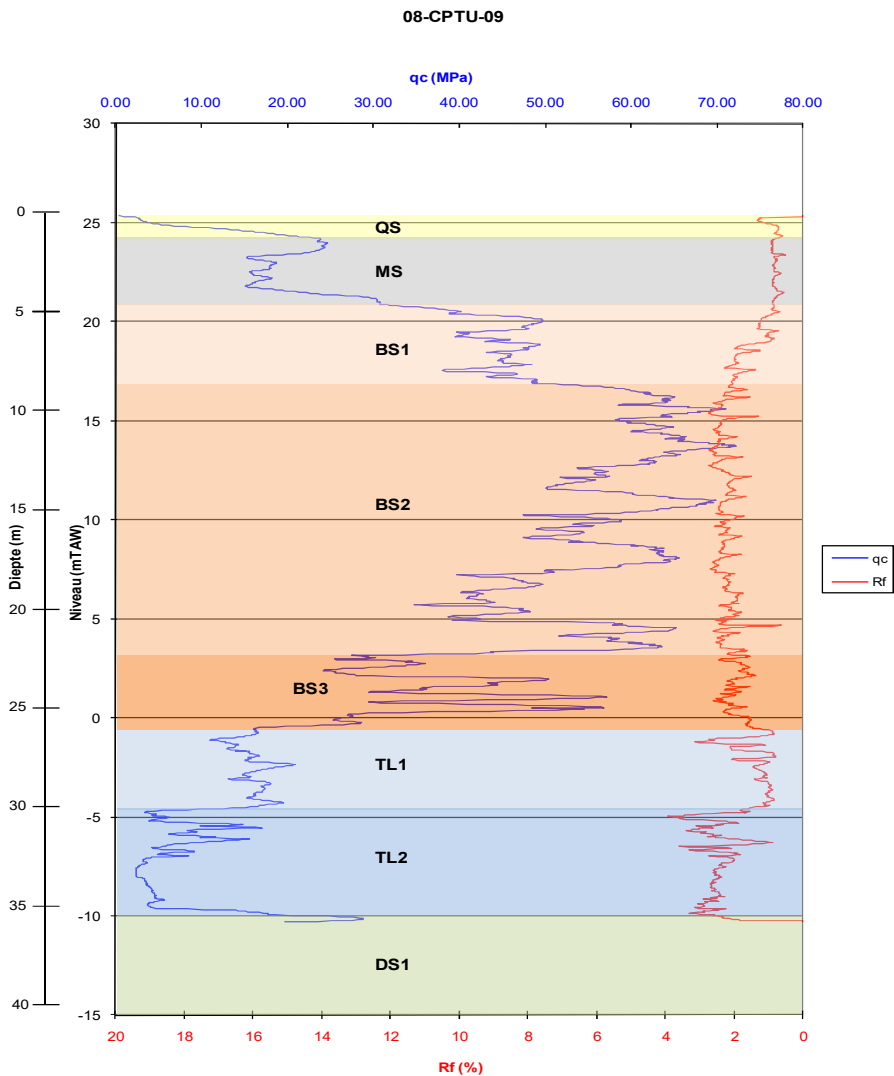
Vanuit geotechnisch oogpunt kan de ondergrond onderverdeeld worden in vijf eenheden, waarvan sommige verder opgedeeld zijn in kleinere subeenheden. Deze komen niet noodzakelijkerwijs eenduidig overeen met de lithostratigrafische indeling. Het onderscheid tussen formaties is immers niet altijd bepalend voor de geotechnische berekeningen, waarbij enkel de geomechanische parameters een rol spelen [OD-086]. In Figuur 4 - 138 is bij wijze van voorbeeld een CPT weergegeven waarop de verschillende hieronder beschreven (sub)eenheden zijn aangeduid.

De vijf geotechnische eenheden ter hoogte van de bergingsite zijn:

- **Eenheid QS:** Losse tot matig dichte zanden met organisch materiaal (bodemmateriaal, Quartaire fijne, gele tot geelbruine dekzanden). Deze laag heeft een gemiddelde dikte van 1,2 m. Ze zal samen met de aanwezige vegetatie geheel of gedeeltelijk uitgegraven worden voor de start van de constructiewerken.
- **Eenheid MS:** Middelmattig-grove tot grove witte en witgele zanden. De gemiddelde diepte onder het oppervlak loopt van 1,2 m tot 5,7 m en omvat Quartaire en Mol zanden.
- **Eenheid BS1, BS2, BS3:** Dichte, fijne zanden behorende tot de Mol en Kasterlee Formaties. De subeenheid BS1 wordt aangetroffen op een gemiddelde diepte van 5,7 m tot 10 m onder het maaiveld. De subeenheden BS2 (gemiddelde diepte van 10 m tot 22,9 m) en BS3 (gemiddelde diepte van 22,9 m tot 28,3 m) zijn licht glauconiethoudend. Subeenheid BS3 is kleiiger dan de andere twee subeenheden.
- **Eenheid TL1, TL2:** Afwisseling van lenzen van zandige klei en matig dicht tot dicht, kleilig zand. Deze laag vormt de overgangslaag tussen de bovenliggende Kasterlee zanden en de onderliggende Diest Formatie. De subeenheid TL1 is zandiger dan subeenheid TL2 en is niet op elke locatie waargenomen. De gemiddelde diepte van TL1 is van 26,9 m tot 30,2 m onder het maaiveld. Subeenheid TL2 wordt teruggevonden op een gemiddelde diepte van 30,2 m tot 35,4 m onder het oppervlak.
- **Eenheid DS1, DS2:** Dicht, glauconiethoudend zand van de Diest Formatie. Subeenheid DS1 bestaat uit middelmattig tot fijn zand en stopt op een gemiddelde diepte van 57,7 m onder het maaiveld. De zanden van subeenheid DS2 hebben over het algemeen een grovere korrelverdeling. Deze laag loopt door tot een diepte van meer dan 125 m onder het oppervlak.

---

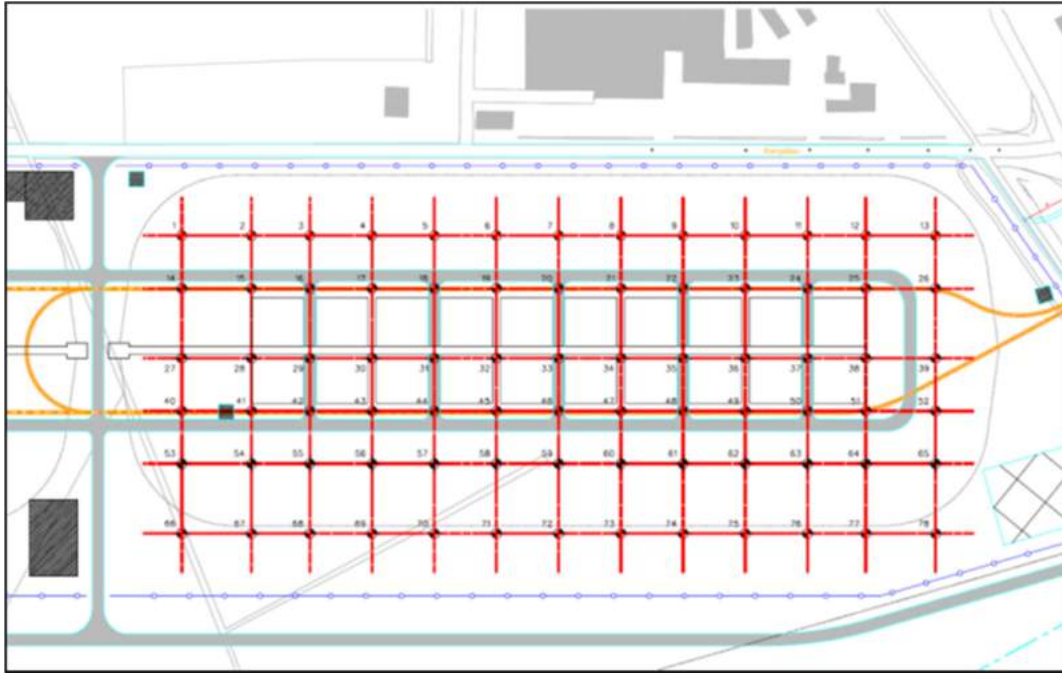
<sup>56</sup> Het wrijvingsgetal wordt bepaald als de verhouding tussen wrijvingsweerstand en conusweerstand.



**Figuur 4 - 138: Aanduiding van de verschillende geotechnische (sub)eenheden op basis van een CPT (08-CPTU-09) gelegen op de bergingssite.  $q_c$ : puntweerstand (Mpa);  $R_f$ : wrijvingsgetal (kleef/puntweerstand).**

De bepaling van de dieptes en diktes van de eenheden gebeurt voornamelijk op basis van de talrijke diepsonderingen (CPT's) uitgevoerd tijdens de vier terreincampagnes. De CPT's geven aan dat de dieptes en diktes licht variëren van locatie tot locatie.

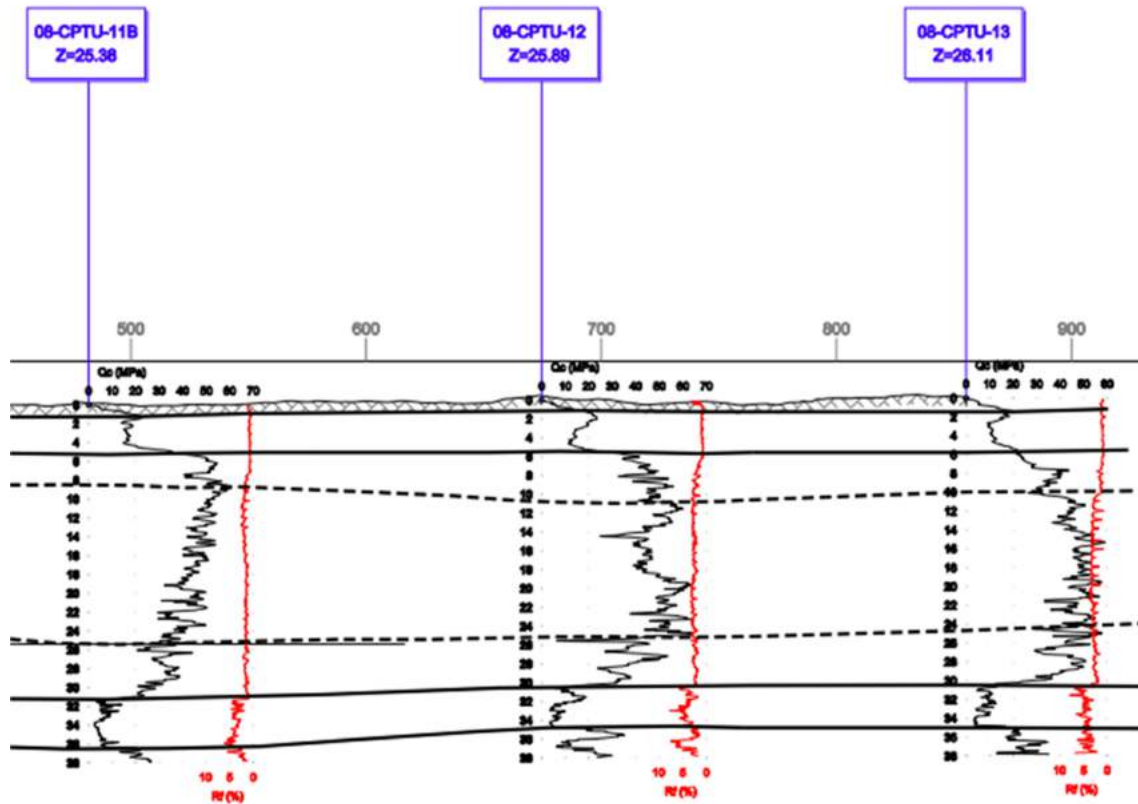
De sondeercampagne van 2010 had tot specifiek doel om de lokale variabiliteit van de ondergrond ter hoogte van de eerste set modules te onderzoeken. Hierbij werden 78 CPT's uitgevoerd op een raster van ongeveer 30 m x 30 m, dit is ongeveer op de vier hoeken van elke module (Figuur 4 - 139). Deze campagne gekenmerkt met een hoge densiteit aan sonderingen heeft geen specifieke anomalieën aan het licht gebracht en bevestigt de homogene opbouw van de ondergrond [OD-086].



**Figuur 4 - 139: Locatie van de meetpunten van de sondeercampagne op de oostelijke tumulus.**

Op basis van deze uitgebreide geotechnische studie werd een karakteristieke lagenopbouw bepaald voor de zone van de oostelijke tumulus. Gezien het grote aantal sonderingen die in rekening worden genomen, kan gesteld worden dat de laagindeling een nauwkeurig beeld geeft van de ondergrond. Er wordt in deze karakteristieke lagenopbouw aangenomen dat de lagen een nagenoeg horizontaal verloop hebben in de zone van de oostelijke tumulus (Figuur 4 - 140). Dit wordt bevestigd door de geotechnische profielen toegevoegd in ([OD-086], bijlage 4) en door de geologische context van de site en zijn omgeving.

Aan elke laag werden voor de verschillende grondparameters karakteristieke waarden toegekend, waarbij telkens werd uitgegaan van het principe dat de gekozen karakteristieke waarde van elke geotechnische parameter een voorzichtige schatting moet zijn. De gemeten waarden werden ook vergeleken met literatuurwaarden voor dergelijke grondsoorten, waarbij eventuele afwijkingen werden verklaard (§4.1.3, §4.4.3, §5.1.3 & §5.6.2 van [OD-086]).



Figuur 4 - 140: West – Oost profiel op basis van de terreinverkenningen van 2008. Deze terreinverkenningen werden uitgevoerd over het hele gebied van het Lokaal Hydrogeologisch model. Het hierboven gegeven W-E profiel situeert zich aan de zuidrand van de bergingsite. De zwarte lijn is de puntweerstand ( $q_c$ ), de rode lijn het wrijvingsgetal (Rf).

Een bijkomende proef ter karakterisering van de ondergrond bestond uit de zettingsproef (zie verder §4.7.4). Alle geotechnische proeven werden verder statistisch geïnterpreteerd [OD-086]:

- Wat betreft de *in situ* proeven (CPT's, boringen, pressiometerproeven en peilbuizen; zie § 4 van [OD-086]), werd voor elke individuele proef een lagenopbouw gedefinieerd en per laag werden karakteristieke waarden toegekend aan de opgemeten parameters. Vervolgens werd de variabiliteit van de ondergrond bestudeerd door de proeven onderling te vergelijken en gemiddelde, minimale en maximale waarden te berekenen voor elke parameter, zoals onder andere laagdikte, conusweerstand, wrijvingsgetal,...
- Voor de laboproeven (zie § 5 van [OD-086]) werd eveneens een statistische interpretatie toegepast, zoals opgelegd in Eurocode 7. Voor de onderkeningsproeven, oedometerproeven en triaxiaalproeven werden gemiddelde, minimale en maximale waarden berekend. Daarnaast werd voor de triaxiaalproeven ook de methode van het 95% betrouwbaarheidsinterval toegepast (dit wil zeggen dat met 95 % betrouwbaarheid de werkelijke gemiddelde waarde niet ongunstiger zal zijn dan de gekozen waarde, zie [R4-170]).

Op basis van de terreinmetingen en de laboratoriumproeven zijn vervolgens representatieve waarden bepaald voor de geotechnische parameters van de verschillende (sub)eenheden (Tabel 4 - 64). De voornaamste parameters zijn het volumegewicht  $\gamma$  (onder en boven de grondwatertafel), de effectieve wrijvingshoek  $\phi'$ , de effectieve cohesie  $c'$ , de elasticiteitsmodulus  $E$  en de glijdingsmodulus  $G$ . Deze zijn noodzakelijk voor de verdere stabiliteitsberekeningen.

**Tabel 4 - 64: Representatieve waarden voor de geotechnische parameters noodzakelijk voor de verdere stabiliteitsberekeningen ter hoogte van de bergingsite. Voor elke eenheid is eveneens een beschrijving van de grondsoort gegeven.**

Eenheid	Grondsoort	$q_c$ (MPa)	$R_f$ (%)	$\gamma_{onverz}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{verz}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\phi'$ (°)	$c'$ (kPa)	$E$ (MPa)	$G$ (MPa)	$E_{max}$ (MPa)	$G_{max}$ (MPa)
QS	Los tot matig dicht, fijn zand met organisch materiaal, weinig siltig, bruin	7	1.1	17	19	30	0	20	7.7	44	17
MS	Matig dicht, middelmatig grof tot grof zand met lokaal fijn grind, witgrijs/witgeel	13	1.0	18	20	35	0	25	9.6	200	75
BS1	Dicht, fijn zand met silt en/of dunnekleilaagjes, witgrijs/geel/grijsbruin	40	1.6	18	20	38	0	70	27	490	190
BS2	Dicht, fijn zand, weinig tot zeer kleiig, licht glauconiethoudend, licht groen/grijsgroen	50	2.5	18	20	38	0	90	35	585	225
BS3	Dicht, fijn zand, kleiig, licht glauconiethoudend, lokaal met dunne zandsteenlaagjes, grijs/groen	40	2.2	18	20	38	0	80	31	325	125
TL1 <sup>(1)</sup>	Matig tot dicht, fijn zand, siltig of kleiig, met zandige kleilaagjes, licht groen	18	1.7	17	19	26	0	35	13.5	585	225
TL2	Vaste klei, zandig, glauconiethoudend, met dunne laagjes kleiig zand, groenbruin/grijsgroen	7	3.9	19	19	25	8	14	5.4	415	160
DS1	Dicht, middelmatig tot fijn zand, kleiig, glauconiethoudend, lokaal met grind of zandsteenlaagjes, donkergroen	23	3.7	18	20	33	2	90	35	750	290
DS2	Dicht, middelmatig tot grof zand, weinig kleiig, glauconiethoudend, lokaal met fijn grind of dunne zandsteenlaagjes, donkergroen	$j^{(2)}$	$j^{(2)}$	18	20	33	0	190	73	2160	830

<sup>(1)</sup> Deze subeenheid wordt niet overal waargenomen

<sup>(2)</sup> De diepte van CPT's is niet voldoende om deze subeenheid te bereiken

Twee bijkomende belangrijke parameters, eveneens opgenomen in Tabel 4 - 64, zijn de dynamische elasticiteitsmodulus  $E_{max}$  en de dynamische glijdingsmodulus  $G_{max}$ . Deze beschrijven het vervormingsgedrag van de ondergrond bij zeer kleine rekken. Ze zijn bijgevolg essentieel in de seismische ontwerpstudies van de structurele componenten van de berging. Uit de zettingsproef is echter gebleken dat zij ook een belangrijke rol spelen bij de bepaling van de zettingen. Dit wordt verder besproken in §4.7.4.

### 4.7.3 Bijkomende relevante parameters

#### 4.7.3.1 Topografie

De topografische hoogte van de site werd nauwkeurig opgemeten in een uitgebreide meetcampagne in 2009. Het gemiddelde topografische niveau van de bergingssite is ongeveer 25,7 m TAW (range van 24,5 m TAW tot 28,5 m TAW). De variatie in hoogte is beperkt tot enkele meters in de beschouwde zone, waarbij voornamelijk in het westelijke deel iets hogere niveaus van gemiddeld 26,2 m TAW opgemeten worden.

#### 4.7.3.2 Grondwaterniveau

Hoewel de hoogte van de grondwatertafel strikt gezien geen geomechanische parameter is, speelt deze een belangrijke rol in alle stabiliteitsberekeningen. Tijdens de verschillende terreincampagnes werden meerdere piezometers geïnstalleerd op de bergingssite. De filterelementen situeren zich zowel in de bovenste freatische laag (Formaties van Mol en Kasterlee) als in de watervoerende lagen onder de kleiige overgangslaag (Formatie van Diest). Voor de stabiliteitsberekening is echter voornamelijk de diepte van de grondwatertafel van belang.

De gegevens van de piezometers worden op regelmatige tijdstippen uitgelezen en hieruit blijkt een duidelijke seizoensgebonden invloed op het grondwaterniveau. Op de bergingssite wordt gemiddeld een verschil van 0,85 cm geobserveerd tussen het winter- en zomerniveau (zie ook Figuur 4 - 101). Uit deze figuur blijkt ook dat een gemiddeld grondwaterniveau van 24,3 m TAW kan aangehouden worden in de stabiliteitsberekeningen. Dit komt overeen met een diepte van ongeveer 1,4 m onder het maaiveld.

#### 4.7.3.3 Karakteristieken van de onderlaag

De onderlaag van de berging bestaat uit een zand-bentonietlaag aan de basis, gevolgd door een 60 cm dikke grindlaag (anticapillaire barrière), bedekt door een ophoging van 2 m uit zand-cement (onder de modules) of verdicht zand (naast de modules). Meer gedetailleerde informatie kan gevonden worden in §8.5.4 van [HS08] “Ontwerp en Constructie” van het veiligheidsdossier.

Bovenstaande componenten bestaan allemaal uit aangevoerde materialen, waarvan de eigenschappen en de kwaliteit van de uitvoering opgelegd en gecontroleerd zullen worden. Ze maken bijgevolg geen deel uit van de natuurlijke ondergrond van de site, maar spelen wel een rol in de stabiliteitsberekeningen (Tabel 4 - 65).

**Tabel 4 - 65: Representatieve waarden voor de geotechnische parameters van de onderlaag, bepaald op basis van ervaringsgegevens en literatuurgegevens.  $\gamma$ : volumegewicht droog en nat;  $\varphi'$ : effectieve wrijvingshoek;  $c'$ : effectieve cohesie; E: Young's modulus.**

Component	Dikte (m)	$\gamma_{onverz}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{verz}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\varphi'$ (°)	$c'$ (kPa)	E (MPa)	G (MPa)	$E_{max}$ (MPa)	$G_{max}$ (MPa)
Grindlaag (anti-capillaire barrière)	0.6	20	22	35	0	140	60	430	180
Zand-cement ophoging	2.0	19.5	21.5	39	220	135	55	410	165
Ophoging van verdicht zand	2.0	18.5	20.5	32.5	0	20	7.7	44	17

#### 4.7.4 Zettingsproef

##### 4.7.4.1 Doelstelling

Het is een bekend fenomeen dat klassieke zettingsberekeningen de werkelijke zettingen overschatten. Voor vele installaties is dit geen onoverkomelijk probleem, aangezien dit overeenkomt met een conservatieve aanpak. De bergingsinstallatie bevat echter meerdere componenten waarvoor een preciezere kennis van de (differentiële) zettingen noodzakelijk is. Daarom werd er ter hoogte van de toekomstige IPM, vlak naast de site van de bergingsmodules, een grootschalige zettingsproef uitgevoerd, uitvoerig beschreven in [OD-188].

De zettingsproef heeft als doel om:

- de grootte van de optredende zettingen en het zettingsgedrag van de ondergrond nauwkeurig op te meten;
- de resultaten te vergelijken met voorspellingen gebaseerd op de klassieke berekeningsmethoden en op de geotechnische gegevens van de drie voorgaande terreincampagnes;
- een terugkoppeling uit te voeren tussen de invoergegevens en de resultaten van een 3D model van de zettingsproef. De invoerparameters van het FLAC3D model worden hierbij aangepast en de resultaten worden vergeleken met de werkelijke zettingen. Na deze iteratieve procedure wordt een optimale set van invoergegevens bekomen, die toelaat om de zetting van de bergingsinstallatie nauwkeurig te berekenen.

##### 4.7.4.2 Proefopstelling

De zettingsproef bestaat uit een zandophoging in de vorm van een afgeknotte piramide. Het bovenzvlak heeft een oppervlak van 20 m op 20 m, het basisoppervlak is 60 m op 60 m en de hoogte bedraagt 20 m (Figuur 4 - 141). Deze afmetingen werden gekozen omdat op die manier de belastingssituatie van één gevulde module gesimuleerd wordt. De ophoging werd uitgevoerd in vier belastingsfasen, elk met een hoogte van 5 m.

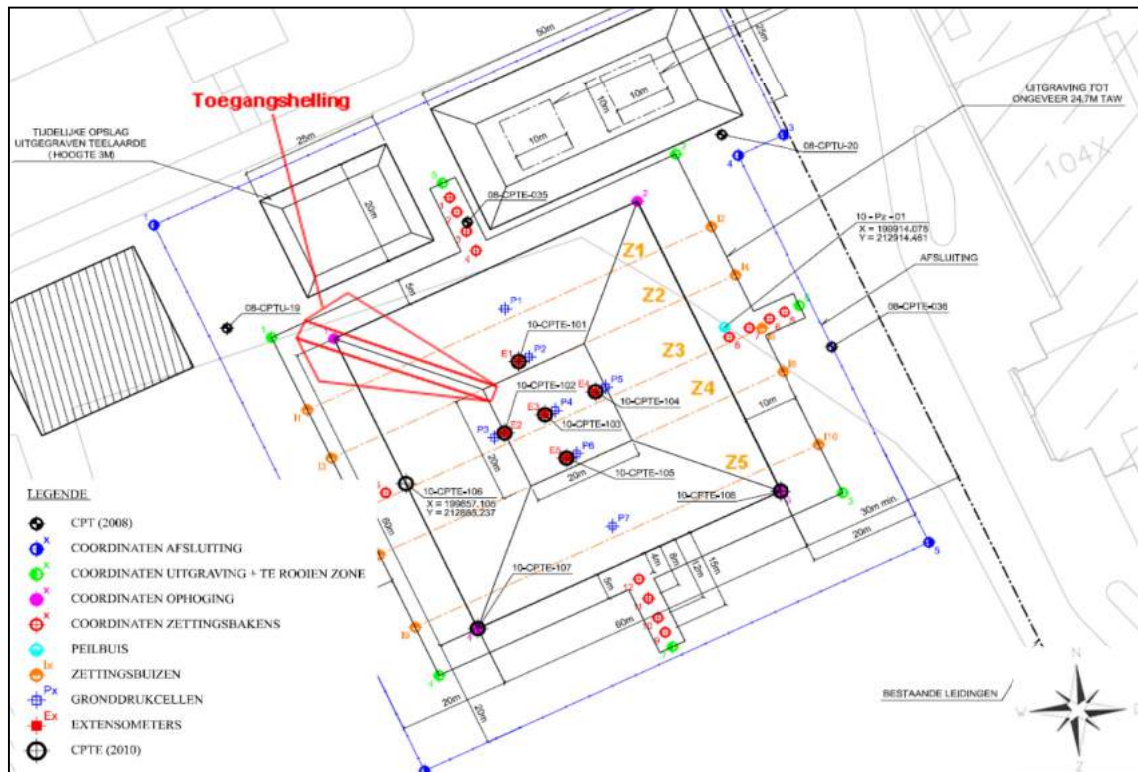


Figuur 4 - 141: Foto van de zettingsproef na afwerking van de vierde fase en na inzaaiing van de flanken om erosie te voorkomen. De aanvoer van het zand gebeurde via een toegangshelling (pijl).

Verskillende types van instrumentatie werden geïnstalleerd onder en rond de ophoging om het zettingsgedrag van de ondergrond nauwkeurig te kunnen monitoren. Figuur 4 - 142 geeft de inplanting van de zettingsproef en de locatie van de verschillende meetinstrumenten. Het betreft:

- 8 voorafgaande CPT's om de laagindeling te bepalen en de overeenkomst in ondergrond tussen zettingsproef en berging te verifiëren;
- 5 extensometers om het zettingsgedrag in functie van de diepte op te meten, allen voorzien ter hoogte van het bovenvlak omdat de belasting daar het grootst is;
- 7 drukcellen ter controle van de aangebrachte belasting;
- 5 horizontale inclinometers die toelaten om op regelmatige tijdstippen een horizontaal profiel op te meten van de zettingen ter hoogte van het basisvlak van de ophoging;
- 16 topografische referentiepunten om de invloedzone van de proef te bepalen;
- 1 piezometer ter opmeting van het niveau van de grondwatertafel (bovenste aquifer).

De opmetingen van de extensometers, drukcellen en piezometer gebeurden automatisch met behulp van een datalogger volgens een vastgelegd meetschema. De inclinometers en topografische referentiepunten werden manueel opgemeten op regelmatige tijdstippen.



Figuur 4 - 142: Inplanting van de zettingsproef en locatie van de instrumentatie.

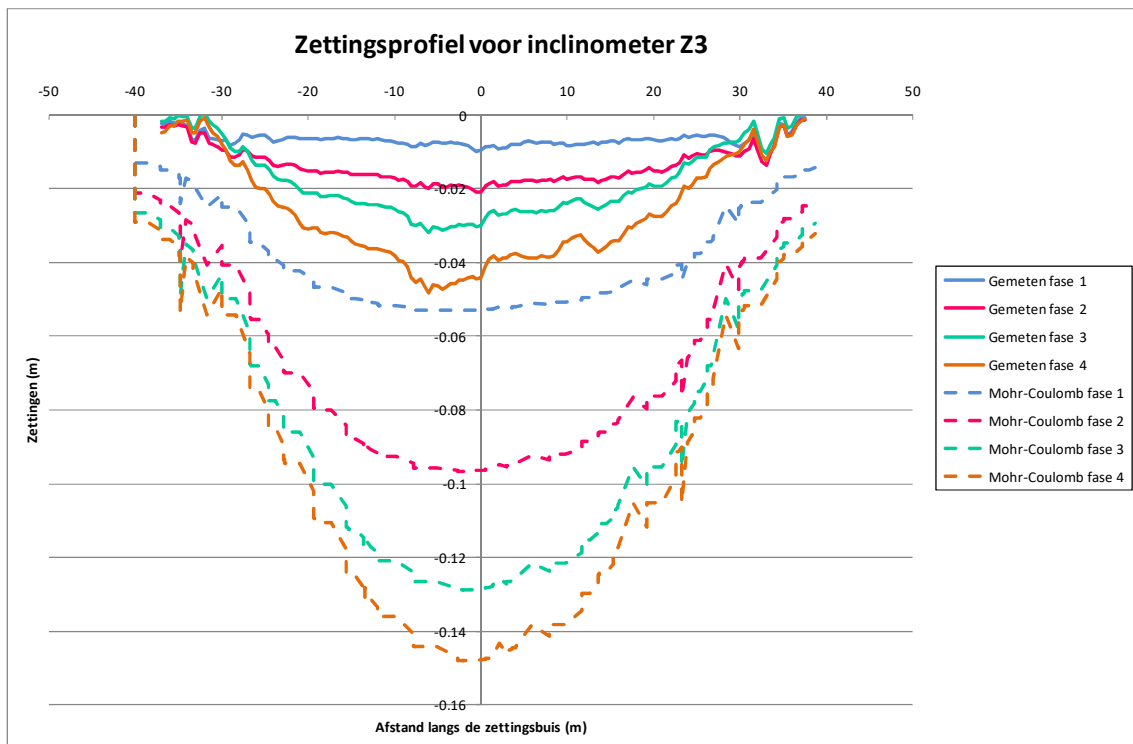


Het aanleggen van de ophoging nam een periode van ongeveer twee maanden in beslag. Vervolgens werden er nog gedurende drie maanden op intensieve manier metingen verricht ter bepaling van het tijdsafhankelijk gedrag van de ondergrond. Een laatste opmeting gebeurde zes maanden later, i.e.e. elf maanden na de start van de bouw van de ophoging.

#### 4.7.4.3 Resultaten

De maximale zettingen worden opgemeten onder het centrum van de piramide, waar de belasting op de ondergrond het grootst is. Nadat de ophoging de finale hoogte van 20 m heeft bereikt, bedraagt de zetting daar 4,8 cm. De zetting ter hoogte van het basisvlak van de piramide, zoals opgemeten na elke belastingsfase in de centrale inclinometer Z3, is geïllustreerd in Figuur 4 - 143.

Het resultaat kan worden vergeleken met voorspellingen gebaseerd op de typische berekeningsmethoden. De meest relevante methode is in dit geval een 3D model met behulp van de eindige elementen software Plaxis 3D, waarbij de “Mohr-Coulomb” constitutieve wet gebruikt wordt om het materiaalgedrag te beschrijven. Meer informatie betreffende deze software wordt gegeven in [HS08]; §8.3.3.2 ‘methode’. De resultaten van het 3D model zijn eveneens getoond in Figuur 4 - 144 en hieruit blijkt duidelijk de overschatting van de werkelijke zettingen in alle belastingsfasen.



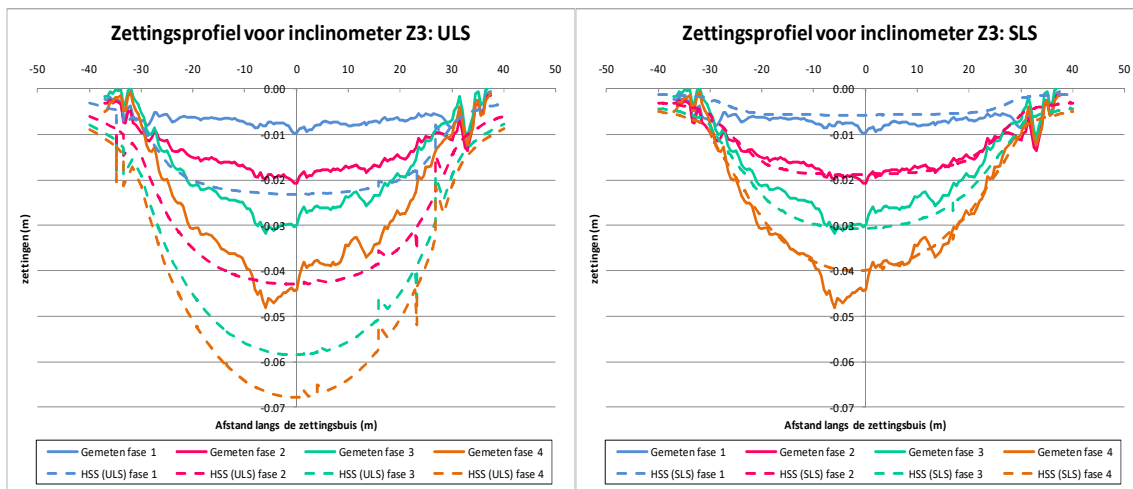
Figuur 4 - 143: Gemeten en voorspelde (“Mohr-coulomb” materiaalgedrag) zetting (‘in m) ter hoogte van de centrale inclinometer Z3.

In de interpretatie van de zettingsproef werd vervolgens overgeschakeld naar meer gespecialiseerde materiaalmodellen, zoals het “*Hardening soil (HS)*” en “*Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSS)*” model. Dit laatste houdt rekening met twee fysische fenomenen die niet in klassieke zettingsberekeningen worden opgenomen, namelijk:

- het feit dat de ondergrond zich stijver zal gedragen bij hogere totaalspanningen;
- het feit dat voor zeer kleine vervormingen het verband tussen spanning en rek beschreven wordt met behulp van  $G_{max}$  in plaats van  $G$ .

De bijkomende parameters, die nodig zijn in het HSS model, kunnen op basis van correlatieformules afgeleid worden uit de gegevens van laboratorium en terreinproeven. Voor de bergingssite werd dit onder andere gedaan met data van de zelfborende pressiometerproef uitgevoerd tijdens de terreincampagne van 1999. De voorspelde zettingen onder de ophoging worden met deze set van invoergegevens nog steeds licht overschat, maar er is een veel betere coherentie tussen het voorspelde en werkelijke zettingsgedrag (Figuur 4 - 144).

Vervolgens werd er een iteratieve terugkoppeling gedaan tussen de invoerparameters in het 3D HSS model en de metingen van de zettingsproef. Hierbij werden in verschillende optimalisatiestappen, de voorspelde en gemeten zettingen vergeleken en werden specifieke invoerparameters voor de verschillende grondeenheden aangepast. De optimale set van invoerparameters die hieruit volgt, laat een zeer goede berekening toe van het werkelijke zettingsgedrag van de ondergrond (Figuur 4 - 144).



**Figuur 4 - 144: Gemeten en voorspelde zetting (in m) (“*Hardening Soil Small Strain Stiffness*” materiaalgedrag) ter hoogte van de centrale inclinometer Z3. De invoergegevens werden bepaald, (A): op basis van de data van de zelfborende pressiometer; en (B): via een terugkoppeling van de gemeten waarden.**

Een laatste stap in de interpretatie van de zettingsproef bestond uit het evalueren van de tijdsevolutie van de zettingen. De ondergrond is echter voornamelijk opgebouwd uit zandige lagen, waarin zettingen quasi onmiddellijk na het aanbrengen van de belasting optreden. Een consolidatieanalyse in het Plaxis 3D model gaf aan dat de invloed van de tijd op de zettingen zeer gering is. Dit werd bevestigd door frequente metingen over

een periode van drie maanden na het vervolledigen van de ophoging en een extra meting zes maanden later. Er werden geen bijkomende zettingen opgemeten en er kan bijgevolg besloten worden dat het tijdseffect niet in rekening hoeft gebracht te worden bij de zettingsberekeningen van de berging.

#### 4.7.4.4 Conclusies

De zettingsproef toont aan dat een grondige evaluatie van de zettingen van de berging kan bekomen worden met behulp van een 3D model, waarbij voor het “*Hardening Soil Small Strain Stiffness*” materiaalmodel twee sets van invoerparameters gebruikt worden.

Voor de ontwerpberekeningen van de berging blijken de invoerparameters bepaald op basis van correlatieformules en de data van de zelfborende pressiometerproef een goed compromis te vormen tussen veiligheid en nauwkeurigheid in de beschrijving van het zettingsgedrag. Er wordt daarom voorgesteld deze parameters te gebruiken voor uiterste grenstoestand berekeningen (*Ultimate Limit State* - ULS). De berekende zettingen zijn aldus, voor de grootteorde van belastingen die zal optreden in de berging, een overschatting van de werkelijke zettingen (conservatieve benadering).

Voor berekeningen in gebruiksgrenstoestand (SLS - *Serviceability Limit State*) wordt voorgesteld om de invoergegevens verkregen via de terugkoppeling tussen de voorspelde en gemeten zettingen te gebruiken. Deze leiden tot een berekening van zettingen die het best overeenkomen met het werkelijke zettingsgedrag.

#### 4.7.5 Verificatie stabiliteit van de installaties

De aspecten van draagkracht, zettingen en liquefactie worden in [HS08] van het veiligheidsdossier behandeld, en meer bepaald in §8.3.3.1, §8.3.3.2 en §8.3.3.3.

## 4.8 Geochemische karakteristieken

### 4.8.1 Vaste fase

In dit deel wordt de mineralogische en (geo)chemische samenstelling van het sediment ontleed, waarbij er eveneens ingegaan wordt op de verdelingscoëfficiënt van uranium.

#### 4.8.1.1 Mineralogie

De mineralogische kenmerken van de verschillende lagen zijn gebaseerd op [R4-171] en zijn weergegeven in Tabel 4 - 66. Het gehalte aan kwarts is het hoogst in de bovenste stratigrafische eenheden (Mol en Kasterlee), terwijl glauconiet belangrijker wordt naar onder toe (Diest-Dessel-Voort). De onderste lagen (Eigenbilzen en Boom) tonen hogere waarden voor phyllosilicaat (kleimineralen). De Kasterlee Klei bevat wat glauconiet, samen met een behoorlijke hoeveelheid phyllosilicaten.

**Tabel 4 - 66: Mineralogische samenstelling van de vaste fase (in %). Q = kwarts; K-vsp = K-veldspaat; Plag. = plagioklaas; Glauc. = glauconiet; Kaol. = kaoliniet; Chlor. = chloriet; I-Sm = illiet-smectiet; Smec. = smectiet. Standaardafwijkingen in cursief. (n: aantal stalen; na: niet geanalyseerd; nvt = niet van toepassing).**

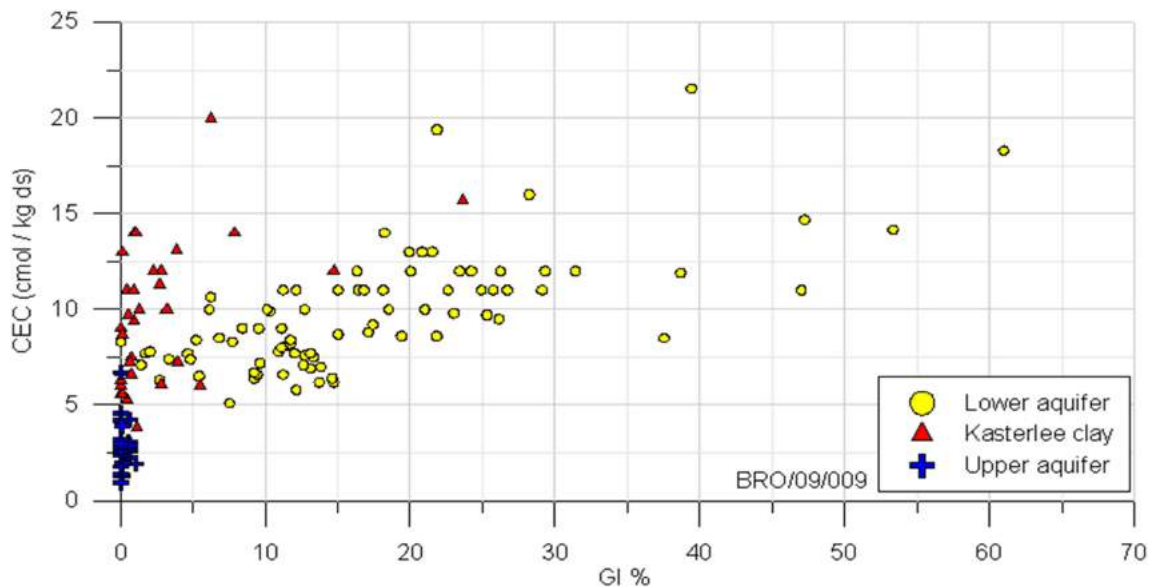
Stratigrafie	n	Q	K-vsp	Plag.	Glauc.	Kaol.	Chlor.	Illiet	I-Sm	Smec.
Boven-Mol	3	95,3/4,2	1,3/1,2	0,3/0,6	0,0/0,1	1,0/1,0	0,0/0,0	2,3/2,1	0,0/0,0	0,0/0,0
Onder-Mol	1	94,0/nvt	2,0/nvt	0,0/nvt	0,0/nvt	0,4/nvt	0,0/nvt	4,0/nvt	0,0/nvt	0,0/nvt
Kasterlee	2	91,0/1,4	3,0/0,0	0,0/0,0	0,0/0,0	2,0/1,4	0,5/0,6	3,5/0,7	0,0/0,0	0,0/0,0
Kasterlee Klei	3	65,3/17,0	4,7/0,6	0,0/0,0	2,6/3,7	7,7/6,0	1,6/2,1	15,7/11,0	1,0/1,7	0,7/1,2
Diest (kleilig)	2	57,5/17,7	3,5/0,7	0,2/0,2	28,4/12,0	0,4/0,2	0,4/0,6	6,0/7,8	1,0/1,4	1,5/0,7
Diest (ca. 45 m)	1	80,0/nvt	3,0/nvt	0,0/nvt	16,5/nvt	0,0/nvt	0,0/nvt	2,0/nvt	0,0/nvt	0,0/nvt
Diest (ca. 115 m)	1	55,0/nvt	8,0/nvt	4,0/nvt	24,0/nvt	2,0/nvt	0,0/nvt	2,0/nvt	5,0/nvt	1,0/nvt
Dessel	1	70,0/nvt	6,0/nvt	0,8/nvt	22,5/nvt	0,0/nvt	0,0/nvt	na	na	na
Voort	1	70,0/nvt	6,0/nvt	0,8/nvt	21,2/nvt	0,2/nvt	0,0/nvt	na	na	na
Voort/Eigenbilzen	5	61,4/5,0	9,4/1,5	3,6/1,1	0,6/0,6	2,6/1,3	0,6/0,8	4,6/2,3	11,6/1,3	4,2/1,5
Boom (Boeretang)	3	47,3/6,0	8,7/1,2	5,0/1,0	0,0/0,0	5,3/1,5	2,3/1,2	7,3/3,2	16,7/2,1	5,3/0,6

#### 4.8.1.2 Glauconiet en het kationuitwisselingsvermogen (CEC)

Zoals verwacht zijn de hoeveelheden glauconiet het grootst voor de Diest Formatie, in de grootteorde van 10 tot 30% (Tabel 4 - 66). De Kasterlee Klei vertoont meestal een daling van de hoeveelheid glauconiet in het bovenste gedeelte van het stratigrafische profiel, terwijl de waarden bijna nul of nul zijn voor het zandige deel van de Kasterlee en Mol Formaties. Extreem hoge waarden werden gevonden in ON-Dessel-5 boring tot in de Boomse Klei, waar de Zanden van Berchem worden gekenmerkt door een hoeveelheid glauconiet tot 60%.

Er bestaat een duidelijk verband tussen enerzijds de hoeveelheid glauconiet en de korrelgrootte, en anderzijds het kationuitwisselingsvermogen of CEC (cation exchange capacity) (Figuur 4 - 145). De CEC correleert met een verhoogde hoeveelheid glauconiet en de hoeveelheid kleideeltjes in het sediment. Als gevolg hiervan zijn de hoogste waarden voor de CEC te vinden in de Formatie van Diest en bereikt het 10-20 cmolc/kg in enkele

monsters. In de Kasterlee Klei bedraagt de CEC tot 10 cmol/kg in enkele stalen. Toch zijn grote verschillen aangetroffen tussen de afzonderlijke boorputten. In ON-Dessel-2 lopen de CEC waarden gemakkelijk op tot 20 cmol/kg voor de Zanden van Diest en de Kasterlee Klei, terwijl dit meestal 10% of minder bedraagt in ON-Geel-1. In ieder geval is de CEC het laagste voor de Formaties van Kasterlee en Mol.



Figuur 4 - 145: Glauconietgehalte (gewicht %) versus CEC (cmol<sub>e</sub>/kg droge stof), §7.1.3.1 in [OD-051].

Correlatiecoëfficiënten werden bepaald voor de CEC en het gehalte aan glauconiet (Tabel 4 - 67). Rekening houdend met de afzonderlijke boorputten, werden zeer hoge correlaties verkregen voor ON-Dessel-4 (onderste watervoerende laag), ON-Kasterlee-1 (Kasterlee klei) en ON-Retie-2 (bovenste watervoerende laag). Dit laatste resultaat is een uitzondering want alle andere boorgaten vertonen negatieve correlaties voor de bovenste watervoerende laag.

De adsorptiecapaciteit van glauconiethoudende zanden (Zanden van Kasterlee en Diest) werd eerder bepaald voor de site van Umicore-Olen [R4-172]. Deze zanden hebben een glauconietgehalte van 15-25% en de CEC bedraagt 8 tot 12,5 cmol<sub>e</sub>/kg. De verdelingscoëfficiënt  $K_d$  voor radium en uranium werden bepaald op deze zanden, en dit op twee verschillende manieren: (1) op basis van een *in situ* aanpak. De  $K_d$  waarden variëren van 132 tot 653 L/kg voor radium en 68 L/kg voor uranium; (2) met behulp van een batch-techniek. De adsorptie- en desorptie voor radium werd respectievelijk geschat op 1 093 L/kg en 197 L/kg, terwijl voor uranium de waarden voor de adsorptie- en desorptiesten 146 L/kg en 204 L/kg bedragen.

**Tabel 4 - 67: Correlatiecoëfficiënten tussen glauconietgehalte en CEC voor elke boring en hydrostratigrafische eenheid afzonderlijk en voor de gecombineerde gegevens. N.C.: niet berekend omdat er onvoldoende gegevens waren; BWL: bovenste watervoerende laag; OWL: onderste watervoerende laag.**

	Dessel 2	Dessel 3	Dessel 4	Dessel 5	Geel 1	Kasterlee 1	Retie 1	Retie 2	Alle boringen
<b>BWL</b>	-0,15	-0,62	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	0,89	<b>-0,06</b>
<b>Kasterlee Klei</b>	0,45	0,39	0,42	N.C.	N.C.	1,00	-0,27	0,85	<b>0,47</b>
<b>OWL</b>	0,49	0,09	0,99	0,56	0,72	0,61	0,77	0,35	<b>0,68</b>
<b>Alle eenheden</b>	<b>0,70</b>	<b>0,50</b>	<b>0,63</b>	<b>0,56</b>	<b>0,74</b>	<b>0,61</b>	<b>0,73</b>	<b>0,57</b>	<b>0,63</b>

#### 4.8.1.3 Chemische analyse van de vaste fase

Voor een totaal van 22 monsternames werd de concentratie van de belangrijkste kationen ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) op de vaste fase geanalyseerd (§7.1.4 van [OD-051]). De resultaten zijn samengevat per hydrostratigrafische eenheid in Tabel 4 - 68. Gedetailleerde mineralogische gegevens zijn beschikbaar uit [R4-171]. Algemeen is de concentratie van de belangrijke kationen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  en  $\text{K}^+$  in de vaste fase het laagst in de bovenste geologische lagen, namelijk de Formaties van Mol (en/of Brasschaat en Poederlee) en Kasterlee. Dit staat in verband met het extreem lage gehalte aan glauconiet en een zeer laag kleigehalte. Het is duidelijk dat de concentraties van deze elementen (veel) hoger ligt in de Kasterlee Klei en de onderliggende eenheden tot de Zanden van Dessel. Algemeen is deze trend gekoppeld aan een stijging van het gehalte aan glauconiet (Formaties van Diest en Dessel) en/of het klei-silt gehalte. Het kationuitwisselingsvermogen volgt dezelfde trend. Hoge CEC-waarden werden gemeten in het kleirijke deel van de Zanden van Diest ('Diest kleiige zone'), in de kleirijke zanden van de Formaties van Voort/Eigenbilzen en in de Boom Formatie. Het grote verschil met betrekking tot de beschouwde elementen voor de laatste formaties is het extreem hoge Na-gehalte van 1,0-1,5 %, in vergelijking met 0,01-0,1 % voor de Mol-Kasterlee-Diest opeenvolging. Verderop zullen voor dezelfde diepten zeer hoge chloride concentraties worden aangetoond.

**Tabel 4 - 68: Samenvatting van de analyses voor de vaste fase. Gegevens zijn weergegeven voor glauconietgehalte (%), CEC (cmol<sub>e</sub>/kg), kationengehalte (%) en korrelgrootteverdeling (%). MI/Pd/Bs = afzettingen die behoren tot de sedimentaire cyclus Mol/Poederlee/Brasschaat. Standaardafwijkingen in *cursief*. (n: aantal stalen; nvt: niet van toepassing).**

	n	Glauc. (%)	CEC (cmol <sub>e</sub> /kg)	Ca (%)	K (%)	Mg (%)	Nvt (‰)	Klei (%)	Silt (%)	Zand (%)
MI/Pd/Bs	1	0,00/nvt	2,4/nvt	0,1/nvt	2,7/nvt	0,76/nvt	0,0/nvt	5,8/nvt	2,6/nvt	91,6/nvt
Boven-Mol	2	0,05/0,05	1,7/0,4	0,5/0,4	0,9/1,0	0,34/0,28	0,02/0,01	2,8/3,7	2,1/2,4	95,2/6,1
Onder-Mol	1	0,05/nvt	1,3/nvt	0,3/nvt	1,0/nvt	0,37/nvt	0,04/nvt	2,7/nvt	4,2/nvt	93,1/nvt
Kasterlee zand	2	0,01/0,01	2,5/0,9	0,2/0,0	1,4/0,4	0,46/0,10	0,01/0,01	3,8/3,0	13,1/12,4	83,1/9,5
Kasterlee Klei	3	2,0/3,1	5,9/0,5	1,0/0,3	6,4/2,5	2,30/0,72	0,04/0,01	16,1/5,8	20,8/11,0	63,1/13,9
Diest (kleilig)	2	15,3/8,1	9,5/0,7	2,9/2,4	12,8/6,0	5,15/1,48	0,08/0,06	4,7/0,8	13,3/6,8	82,0/7,6
Diest	2	9,5/2,8	6,6/2,1	5,1/2,2	12,0/0,0	4,10/0,28	0,09/0,04	0,6/0,5	2,9/1,5	96,5/2,0
Dessel	1	15,0/nvt	8,7/nvt	2,5/nvt	11/nvt	4,40/nvt	0,08/nvt	1,1/nvt	2,2/nvt	96,7/nvt
Voort/Eig	5	2,2/0,5	11,2/2,9	4,4/2,9	7,3/1,1	4,74/0,75	0,57/0,10	1,6/0,4	49,7/5,3	48,8/5,0
Boom Boeretang	3	0,7/0,3	18,0/2,6	3,2/1,0	8,5/1,3	7,33/1,21	1,17/0,29	1,4/0,5	75,3/11,9	23,3/11,5

Twee of drie grote verschuivingen in concentraties van elementen worden waargenomen. De eerste ligt op de grens van het Kasterlee Zand met de Kasterlee Klei, met een duidelijke toename van het K<sup>-57</sup>, Mg- en Ca-gehalte. Typisch voor het Kasterlee Zand is het relatief lage gehalte aan glauconiet. Dit betekent dat de stijging van de hiervoor genoemde elementen verbonden is met het klei- en/of silt-gehalte, of andere minerale fasen (veldspaten, ...).

Deze overgang markeert de grens van de eerste, i.e. de bovenste, watervoerende laag, waarvan de sedimenten relatief arm zijn aan de belangrijkste kationen in de vaste fase. De tweede verschuiving ligt aan de andere zijde van de grens Kasterlee/Diest, waar een verdere toename van het gehalte aan K en Mg wordt gemeten, samen met hogere waarden voor Ca en Na. Deze verandering lijkt samen te hangen met een toename van het gehalte aan glauconiet. De tweede overgang markeert de bovengrens van de onderste watervoerende laag, die gekenmerkt wordt door sedimenten met een relatief hoger gehalte aan de belangrijkste kationen in de vaste fase. De derde verschuiving is gelegen op de grens tussen het Zand van Dessel en de Zanden van Voort/Eigenbilzen, waarbij een sterke toename optreedt van het Na-gehalte en een lichte daling van het K-gehalte. De Ca- en Mg-waarden blijven min of meer hetzelfde. Er werden geen analyses in de Zanden van Berchem voorzien.

De gegevens voor de belangrijkste kationconcentraties op de vaste fase zullen worden gebruikt om de chemische samenstelling van het grondwater te interpreteren, dat ook verschillende patronen vertoont die gekoppeld zijn aan de mineralogie en de samenstelling van het adsorptiecomplex.

<sup>57</sup> Het Sibelco zandwinningsbedrijf benut de K concentraties om de exploiterbare Zanden van Mol (lage K concentratie) te onderscheiden van de onderliggende sedimenten.

#### 4.8.1.4 Voorspelling van $K_d$ op basis van elementaire sediment-eigenschappen: meervoudige regressie analyse

Er werd een meervoudige regressie uitgevoerd om de verdelingscoëfficiënt  $K_d$  aan de hand van zand-, silt- en kleifracties te berekenen (§7.2 van [OD-051]). Het kationuitwisselingsvermogen (CEC) en het gehalte aan glauconiet werden eveneens gebruikt als voorspellende variabelen. Van de beschikbare 12  $K_d$ -waarden werden twee monsters niet beschouwd bij gebrek aan CEC en glauconiet metingen (Tabel 4 - 69). Een staal met een zeer hoge  $K_d$  coëfficiënt werd beschouwd als een uitschieter<sup>58</sup> in alle bivariate grafieken (niet afgebeeld) en werd verwijderd uit de gegevenslijst.

Voor de overige negen stalen zijn de gegevens voor alle voorspellende variabelen weergegeven in Tabel 4 - 70. De verdelingscoëfficiënt heeft betrekking op natuurlijk uranium, bestaande uit U-238 (99,3 gew%), U-235 (0,7 %) en U-234 (0,0055 %). Deze coëfficiënt wordt bepaald door een vaste fase – vloeibare fase koppel aan de aquifer te onttrekken, en de U-concentratie in beide fasen te meten. Om de uitwisselbare U-fractie uit de vaste fase te meten wordt een sequentiële extractietechniek toegepast, waarbij geadsorbeerd U uit de vaste fase wordt geëxtraheerd door middel van chemische behandelingen. Het U-gehalte wordt daarna bepaald door ICP-MS analyse. Er werd daarna niet omgerekend naar totaal U-238 omdat dit statistisch geen significant verschil geeft, gezien een meetfout van om en bij de 10% bij zulke lage concentraties.

Uit de analyse bleek dat voor het schatten van  $K_d$  het gebruik van alle gemeten parameters samen een optimale regressie opleverde. Bovendien, omdat niet alle parameters normaal verdeeld waren, werd een transformatie van de gegevens uitgevoerd. Een vierkantsworteltransformatie werd gebruikt voor de fractie zand en klei, en een logaritmische voor de  $K_d$  en glauconiet. Het toepassen van dergelijke transformaties verbetert de regressie aanzienlijk (zie vergelijking hieronder). De coëfficiënt  $R^2$  op die wijze verkregen was 0,945. Een spreidingsdiagram van de berekende versus gemeten  $K_d$  -waarden is weergegeven in Figuur 4 - 146.

$$K_d = 10^{-14.638 + 1.4221 * \sqrt{\text{Sand}} + 0.07806 * \text{Silt} + 0.3390 * \sqrt{\text{Clay}} + 0.16378 * \text{CEC} - 0.664 * \log(\text{Gl} + 1)}$$

Met “Sand”, “Silt”, “Clay” de respectieve fracties, het gehalte aan glauconiet (Gl) en CEC als het kationuitwisselingsvermogen.

<sup>58</sup> Staal Dessel-5 (145 m, Zanden van Berchem) werd verwijderd uit de analyse omdat de mineralogie gelijkaardig is aan deze van Dessel-5 (160,1 m, Zanden van Voort) en Dessel-2 (45 m, Zanden van Diest), maar zijn  $K_d$  is een grootteorde groter.



Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

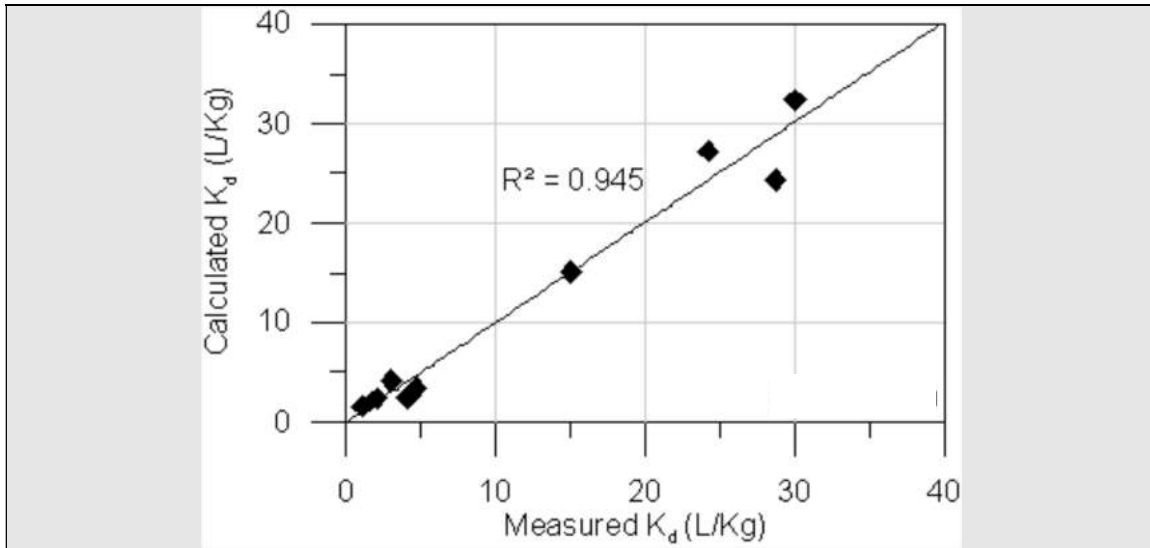
Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

**Tabel 4 - 69: Samenvatting van de gemeten U-concentraties en de resultaten van de  $K_d$  berekeningen.**

Boring	Diepte [m bgl]	Stratigrafie	n	$U_{\text{massa}}$ (mol/kg)	$U_{\text{extract}}$ (mol/kg)	$U_{\text{poriënwater}}$ (mol/L)	$K_d$ (L/kg)
Dessel-2 (7 m)	5,50 - 9,00	Mol	15	2,18E-06	1,88E-08	1,85E-08	1
Dessel-2 (45 m)	45,42 - 45,45	Diest	1	1,08E-05	3,16E-09	< 2,10e-10	15
Dessel-3 (7 m)	5,00 - 9,00	Mol	9	4,12E-06	1,64E-08	1,85E-09	8,9
Dessel-3 (22 m)	Niet beschouwd	-	-	-	-	-	-
Dessel-3 (45 m)	Niet beschouwd	-	-	-	-	-	-
Dessel-4 (21 m)	19,00 - 22,52	Mol	8	6,18E-06	3,75E-08	9,12E-09	4,1
Dessel-5 (120 m)	118,00 - 122,00	Diest	9	5,00E-06	3,14E-09	6,72E-10	4,7
Dessel-5 (145 m)	143,00 - 147,00	Berchem	9	1,89E-05	1,43E-06	9,66E-09	147,7
Dessel-5 (160,1 m)	160,1 - 160,13	Voort	1	1,68E-05	5,30E-07	1,76E-08	30
Dessel-5 (169,1 m)	169,1 - 169,3	Voort/Eigenbilzen	1	1,60E-05	6,96E-07	2,88E-08	24,2
Dessel-5 (181,1 m)	181,06 - 181,09	Voort/Eigenbilzen	1	1,76E-05	6,48E-07	2,26E-08	28,7
Retie-1 (7 m)	5,03 - 9,00	Mol	9	4,92E-06	2,78E-08	1,34E-08	2,1
Retie-1 (20 m)	18,00 - 22,00	Mol/Kasterlee	9	3,70E-06	1,26E-08	1,19E-08	1,1
Retie-1 (45 m)	43,00 - 46,53	Diest	7	7,52E-06	4,03E-09	1,34E-09	3

**Tabel 4 - 70: Gebruikte gegevens voor de meervoudige regressie samen met de gemeten en berekende  $K_d$  waarden**

boring	Zand (%)	Silt (%)	Klei (%)	CEC (meq/100g)	Glauc. (gew%)	$K_d$ gemeten (L/kg)	$K_d$ berekend (L/kg)
Dessel-2 (45 m)	84,80	10,90	4,30	14,16	53,33	15,00	15,09
Dessel-4 (21 m)	93,00	3,70	3,30	2,50	0,00	4,10	2,46
Dessel-5 (120 m)	97,35	1,70	0,95	9,75	24,15	4,70	3,34
Dessel-5 (160,1 m)	89,80	9,50	0,70	17,00	50,60	30,00	32,40
Dessel-5 (169,1 m)	41,60	57,10	1,30	15,00	3,00	24,20	27,22
Dessel-5 (181,06 m)	47,50	51,10	1,40	13,00	1,80	28,70	24,29
Retie-1 (7 m)	93,35	2,55	4,10	2,40	0,00	2,10	2,40
Retie-1 (20 m)	93,75	2,95	3,30	1,38	0,00	1,10	1,60
Retie-1 (45 m)	92,85	6,25	0,90	9,00	11,90	3,00	4,09



Figuur 4 - 146: Spreidingsdiagram met de gemeten en berekende  $K_d$  waarden

De resultaten tonen aan dat de  $K_d$  varieert over één grootte-orde binnen de verschillende eenheden van de Neogeen aquifer. De laagste waarden (1 L/kg tot 4 L/kg) worden systematisch teruggevonden in sedimenten met een zandgehalte van meer dan 93% (voornamelijk kwarts). De hoogste  $K_d$  waarden (tot ~ 30 L/kg) worden gevonden in sedimenten met ofwel veel glauconiet (>50%) en een aanzienlijk aandeel silt en klei (>10%), of voor zeer klei- en siltrijke sedimenten met een laag glauconietgehalte. Dit toont aan dat glauconiet niet de enige bepalende factor is voor de sorptiecoëfficiënt.

## 4.8.2 Vloeibare fase

### 4.8.2.1 Hydrochemie

Neerslagwater heeft een kleine hoeveelheid opgeloste vaste stoffen en een pH van ongeveer 5,7 (Tabel 4 - 71). Deze laatste waarde is hoger dan die van ondiep grondwater. Zo hebben de stalen van het bovenste deel van de Formatie van Mol (Boven-Mol) een gemiddelde pH-waarde van 5,14 (met een standaard deviatie van 0,95) met een spreiding van 4,16 tot 6,38. Dergelijke lage waarden voor ondiep grondwater zijn gelijklopend met de gegevens<sup>59</sup> die door AMINAL [R4-173] worden gerapporteerd en zijn deels te wijten aan verzuring van het bodemwater onder invloed van  $\text{CO}_2$ -productie en wortelrespiratie in de bodem, vooral door naaldboomvegetatie zoals de *Pinus sylvestris* en *Pinus nigra var. maritima*.

Rivierwater blijkt een bijna neutrale pH te hebben, ongeveer 7,3 (S.D. = 0,37), wat overeenkomt met een pH-waarde die ligt tussen die van grondwater uit de Zanden van Diest en Berchem (Tabel 4 - 71). Dit illustreert de afwateringsfunctie van de rivier. De chemische samenstelling van het oppervlaktewater werd bepaald voor twee

<sup>59</sup> Voor Pleistocene/Pleistoocene formaties (Quartair) was de minimum, respectievelijk maximum gerapporteerde pH 2,83 en 7,83 (gemiddelde pH was 5,68). Voor Pliocene/Pliocene formaties (Neogeen) was de minimum, respectievelijk maximum gerapporteerde pH 2,18 en 7,91 (gemiddelde pH was 6,5).

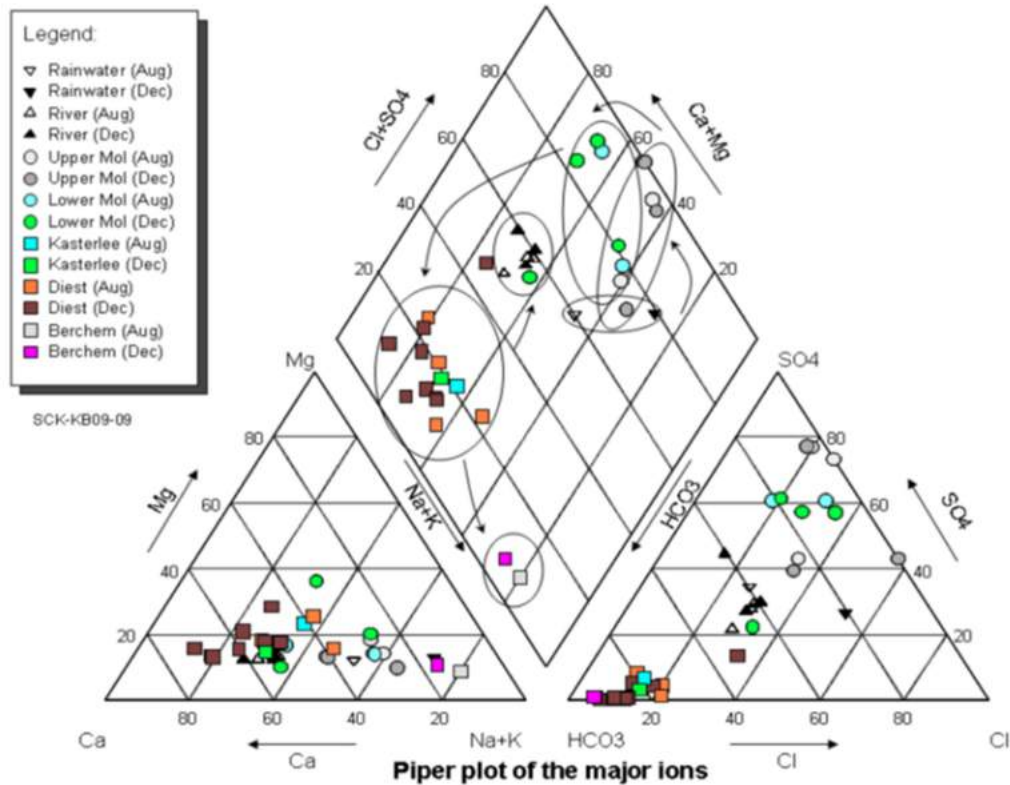
rivieren, voor de Witte Nete (Retie Witte Molen en Dessel zuiveringsstation) en de Hooibeek (afwaarts van inlaat van kanaal) op monsters genomen in augustus en december 2008 [OD-051]. De resultaten zijn opgelijst in Tabel 4 - 71. Een belangrijk kenmerk van de grondwaterchemie is de toename van de pH met drie grootteordes en de alkaliniteit<sup>60</sup> met bijna een grootteorde, vanaf de bovenste lagen naar beneden tot de Zanden van Berchem. Het totale gehalte anorganische koolstof volgt dezelfde trend. Deze stijgt van ongeveer 7 mg/L koolstof voor de Zanden van Mol tot ongeveer 37 mg/L koolstof voor de Zanden van Berchem.

Een globale karakterisering van de grondwaterchemie in vergelijking met het rivier- en neerslagwater wordt getoond aan de hand van het Piper-diagram (Figuur 4 - 147). Door de indeling van de grondwatermonsters op basis van het Piper-diagram kan men de hydrostratigrafische eenheden identificeren met chemisch vergelijkbare grondwaters en de evolutie van de waterchemie langs het stroompad bepalen. Om een Piper-diagram op te stellen wordt eerst de relatieve overmaat aan kationen (in % mg/L) van  $\text{Na}^+\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{Mg}^{2+}$  uitgezet op de kation-driehoek. Dan wordt de relatieve overmaat aan  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , en  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  uitgezet op de anion-driehoek. Punten op de kation en anion driehoeken worden vervolgens gecombineerd in het vierhoekig veld dat de totale geochemische kenmerken van het grondwatermonster weergeeft. Het nadeel van het Piper-diagram is dat het niet geschikt is voor water waar andere kationen of anionen een grote invloed kunnen hebben.

**Tabel 4 - 71: Gemiddelde totale concentratie van de belangrijkste kationen en anionen (in mg/L), pH, elektrische geleidbaarheid (EC,  $\mu\text{S/cm}$ ), totaal anorganische koolstof (TIC, mgC/L) en totaal organische koolstof (TOC, mgC/L) voor grondwater, rivierwater en neerslagwater. Standaardafwijkingen in *cursief*; n: aantal stalen; na: niet geanalyseerd; nvt: niet van toepassing (§7.4.2 in [OD-051]).**

	n	pH	EC	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	TIC	TOC
<b>Neerslag</b>	2	5,68	na	0,69	0,28	2,55	0,44	3,80	4,05	3,41	2,00	0,98	2,19
		<i>0,11</i>	<i>nvt</i>	<i>0,25</i>	<i>0,24</i>	<i>2,47</i>	<i>0,37</i>	<i>1,27</i>	<i>4,17</i>	<i>1,95</i>	<i>0,33</i>	<i>0,68</i>	<i>1,68</i>
<b>Rivier</b>	6	7,27	na	44,11	6,27	25,35	6,17	108,30	38,12	61,67	5,05	19,58	3,03
		<i>0,37</i>	<i>nvt</i>	<i>8,59</i>	<i>0,70</i>	<i>3,02</i>	<i>1,46</i>	<i>27,66</i>	<i>5,13</i>	<i>30,57</i>	<i>2,10</i>	<i>4,75</i>	<i>1,60</i>
<b>Boven- Mol</b>	6	5,14	232,00	15,15	4,32	18,63	24,73	30,58	31,48	83,35	4,20	3,89	6,04
		<i>0,95</i>	<i>35,48</i>	<i>4,11</i>	<i>1,81</i>	<i>3,17</i>	<i>27,78</i>	<i>27,66</i>	<i>11,28</i>	<i>28,88</i>	<i>3,58</i>	<i>4,88</i>	<i>2,57</i>
<b>Onder-Mol</b>	6	6,00	204,83	24,17	7,32	21,39	4,92	41,77	34,25	73,47	0,08	6,72	2,35
		<i>0,45</i>	<i>104,91</i>	<i>18,45</i>	<i>8,12</i>	<i>13,49</i>	<i>2,86</i>	<i>54,45</i>	<i>29,83</i>	<i>51,58</i>	<i>0,15</i>	<i>10,40</i>	<i>2,11</i>
<b>Kasterlee</b>	2	6,54	82,00	11,82	3,11	6,15	6,30	52,40	5,70	2,76	< 0,05	9,68	< 2
		<i>0,17</i>	<i>3,54</i>	<i>1,25</i>	<i>1,83</i>	<i>0,93</i>	<i>5,23</i>	<i>2,55</i>	<i>0,14</i>	<i>1,44</i>	<i>nvt</i>	<i>0,03</i>	<i>nvt</i>
<b>Diest</b>	12	6,70	141,88	18,57	4,16	8,88	3,38	95,67	10,37	3,41	< 0,05	16,27	2,11
		<i>0,37</i>	<i>45,10</i>	<i>8,34</i>	<i>2,68</i>	<i>4,78</i>	<i>2,38</i>	<i>41,44</i>	<i>7,65</i>	<i>5,27</i>	<i>nvt</i>	<i>7,70</i>	<i>1,47</i>
<b>Berchem</b>	2	8,22	231,50	9,81	4,44	59,56	8,10	203,20	7,20	2,28	0,05	36,89	< 3
		<i>0,07</i>	<i>3,54</i>	<i>1,99</i>	<i>0,62</i>	<i>4,86</i>	<i>0,14</i>	<i>5,37</i>	<i>0,71</i>	<i>0,18</i>	<i>0,03</i>	<i>0,97</i>	<i>nvt</i>

<sup>60</sup> Uitgedrukt als mg HCO<sub>3</sub>/L



Figuur 4 - 147: Piper-diagram met de belangrijkste ionen in de waterstalen van de verschillende hydrostratigrafische eenheden, gecombineerd met neerslag- en rivierwater. De monsters werden in de zomer (augustus) en in de winter (december) genomen. Het percentage kationen in mg/L is uitgezet in de linker driehoek, in de rechter driehoek zijn de percentages anionen in mg/L uitgezet. Stalen van de ON-Dessel-5 boorput, die afkomstig zijn uit de diepere hydrostratigrafische eenheden en waarvoor HCO<sub>3</sub> werd gemeten aan de hand van een andere techniek, zijn niet opgenomen.

Verskillende watertypen worden onderscheiden naargelang de bron (Figuur 4 - 147). Neerslagwater behoort niet tot een apart watertype: op zijn minst kunnen de decembergegevens ondergebracht worden bij het chloride-kalium/natrium watertype. Een brede cluster voor de zandige eenheden van Mol wordt waargenomen en is gekenmerkt door een sterke sulfaatcomponent (tussen 60-80%). Volgens de hydrochemische indeling van Piper naar facies zijn de laatste grondwaters van het sulfaattype. Vanuit het oogpunt van de kationen zijn de meeste stalen van het natrium- of kaliumtype, waarbij algemeen Na en K dominant zijn, terwijl er minder zijn van het calciumtype.

In één piëzometer in ON-Retie-1, kan de Kasterlee Fm bemonsterd worden voor wateranalyses. Het grondwatermonster is duidelijk van het waterstofcarbonaattype (anion) en van het calciumtype (kation). Een tweede monster behoort tot geen van de drie types (en behoort dus tot het "niet-dominante" type). De ionische concentraties voor deze stalen lijken op die van de onderliggende Zanden van Diest. Gezien de verschillende samenstelling van de vaste fase van de Kasterlee en Diest Fms wordt deze observatie vermoedelijk verklaard

door een opwaartse grondwaterstroming in de nabijheid van de Kleine Nete (ON-Retie-1) vanuit de Formatie van Diest, doorheen de kleirijkere Kasterlee-Diest overgangslaag naar de Kleine Nete. Een opwaartse gradiënt  $i$  over de Kasterlee Klei/kleiïg Diest is het hele jaar door aanwezig, met een gemiddelde waarde van:  $i = \Delta Z / \Delta H = 2 \text{ m} / 22,5 \text{ m} = 0,089 \text{ m/m}$ .

De samenstelling van het water in de Formatie van Diest is nogal verschillend van de bovenste watervoerende laag. De anionen worden gedomineerd door waterstofcarbonaat (dus van het waterstofcarbonaattype), terwijl Ca het belangrijkste kation wordt (grondwater van het calciumtype). Dit kan worden gerelateerd aan de hogere Ca-concentraties die werden waargenomen in de vaste fase van Diest.

#### 4.8.2.2 Isotopen in de hydrologische cyclus

##### 4.8.2.2.1 Inleiding

De opsporing van isotopen zoals ze in de natuur voorkomen is een waardevol hulpmiddel voor het bestuderen van het gedrag van water in de hydrologische cyclus. De aard van de isotopische toepassingen wordt bepaald door de specifieke eigenschappen van isotopen, zowel de radioactieve als de niet-radioactieve. Drie toepassingstypes kunnen worden onderscheiden (§7.4.3 van [OD-051]):

- Stabiele en radioactieve isotopen kunnen worden gebruikt als tracers voor het traceren van een waterlichaam of een bepaalde hoeveelheid water. Een bekend voorbeeld is dat regenwater tijdens een hevige storm vaak verarmd wordt aan zware isotopen (stabiel  $^2\text{H}$ , deuterium, of stabiel  $^{18}\text{O}$ ) in verhouding tot de meest voorkomende isotopen (respectievelijk  $^1\text{H}$  and  $^{16}\text{O}$ );
- Tijdens de overgang van de ene fase naar de andere van verbindingen zoals water of koolstofdioxide verandert vaak de concentratieverhouding van de isotopen van het element. Het ondergaat een zogenaamde isotopische fractionatie. Omgekeerd, het waarnemen van verschillen, in het bijzonder de concentraties van stabiele isotopen, geeft informatie over de geochemische en hydrologische processen die plaatsvonden. Bijvoorbeeld, als gevolg van een reeks van processen is de isotopische samenstelling van zowel koolstof als zuurstof, afkomstig van calciumcarbonaat in water, verschillend voor zee- en zoetwater. Bovendien varieert de isotopensamenstelling van zuurstof en waterstof in neerslagwater met de breedtegraad, de hoogte, het klimaat en de tijd van het jaar;
- Radioactief verval biedt de mogelijkheid om een ouderdomsbepaling uit te voeren, mits aan bepaalde voorwaarden is voldaan. Opmerkelijk in dit verband is de veelvuldige toepassing van ouderdomsbepaling van grondwater, met andere woorden het bepalen van de tijd die verstreken is sinds de infiltratie van het water, door het vergelijken van de  $^{14}\text{C}$  of  $^3\text{H}$  (tritium) activiteit in een grondwaterstaal met dat van het aanvullende water.

##### 4.8.2.2.2 Zuurstof-18 en deuterium

Vanwege het verschil in massa gedragen stabiele isotopen zich net iets anders in fysische, chemische en biologische processen. Tijdens bijvoorbeeld de verdamping van water en tijdens het uitregenen uit de atmosfeer, worden de stabiele isotopen  $^2\text{H}/^1\text{H}$  en  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  gefractioneerd. De resulterende kleine variaties in de isotopische concentraties kunnen informatie verschaffen over het klimaat op het ogenblik van infiltratie of over de herkomst van het water [R4-174].

Zuurstofisotopen worden vaak gebruikt in grondwatermengstudies, omdat het grondwater meestal een mengsel is van twee of meer genetisch en chemisch verschillende grondwatercomponenten, vaak met een verschillende leeftijd. Isotopische analyses gecombineerd met hydrochemische analyses, bij voorkeur met conservatieve tracers zoals chloride of de verhouding bromide/chloride, maken het mogelijk om onderscheid te maken tussen verschillende soorten grondwater [R4-175].

Bovendien rijst tijdens het uitvoeren van pompproeven af en toe de vraag of grondwaterlichamen, gescheiden door een aquitard, verbonden zijn via 'vensters', met andere woorden of lekkage een rol speelt. Deze vraag kan worden beantwoord als het grondwater in de watervoerende lagen verschillende  $\delta^{18}\text{O}$ -waarden<sup>61</sup> hebben en zich hydrochemisch onderscheiden.

De vermenging van het oppervlaktewater met het grondwater kan worden bestudeerd aan de hand van het isotopsignaal dat werd geleverd door het isotopisch aangerijkt oppervlaktewater. De verplaatsing van dit signaal kan worden gebruikt om de tracersnelheid en de uitbreiding van de kunstmatige aanvulling vast te stellen.

In de huidige studie werden  $^{18}\text{O}$  en  $^2\text{H}$  (deuterium) gemeten in neerslagwater, oppervlaktewater en grondwater. Neerslagwater is opgenomen in de analyse om de volgende reden: als  $^{18}\text{O}$  en  $^2\text{H}$  gebruikt worden om de grondwatervoeding te traceren, dan is het noodzakelijk dat hun concentraties in neerslagwater een typisch signaal opleveren. De analyse van de gegevens spitst zich toe op de identificatie van verschillende types (grond)water en zal worden gebruikt in aanvulling op hun geochemische karakterisering.

De stabiele isotopen  $^{18}\text{O}$  en  $^2\text{H}$  afkomstig van grondwater (peilputten) en uitgeperst water (kernen), neerslagwater en rivierwater zijn weergegeven in Figuur 4 - 148. Twee zogenaamde meteorische waterlijnen zijn eveneens gegeven: de Globale Meteorische Waterlijn (GMWL) en de lokale meteorische waterlijn (LMWL). De GMWL vertegenwoordigt de relatie tussen de  $^2\delta$  en  $^{18}\delta$ -waarden voor de precipitatie in verschillende werelddelen en wordt uitgedrukt als  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ . De lokale meteorische waterlijn levert een basislijn op voor de verschillende grondwaters. Variaties in  $^{18}\delta$  als gevolg van de lokale fysiografie<sup>62</sup> kunnen inderdaad leiden tot specifieke kenmerken die bewaard worden in het grondwater en geven dus inzicht in de aanvalpatronen. In Tabel 4 - 72 worden gegevens uit de huidige studie weergegeven voor stabiele isotopen en opgeloste gassen in neerslag-, rivier- of grondwater.

De isotopische samenstelling van neerslagwater wordt beïnvloed door de temperatuur, want dit is de drijvende kracht in het koelen en condenseren van atmosferische waterdamp. Deze temperatuurafhankelijkheid leidt tot seizoensgebonden schommelingen van de isotopische samenstelling van neerslagwater (zowel  $^{18}\delta$  als  $^2\delta$ ). Neerslag wordt meestal meer verarmd aan zware isotopen bij lagere temperaturen, met andere woorden het wordt isotopisch lichter in het koudere seizoen [R4-176]. Dit wordt bevestigd bij het vergelijken van de zomer- (augustus) en de winterwaarde (december) in Figuur 4 - 148:

- $^{18}\delta$  in august 2008 = -2,33‰ (de gemiddelde maandtemperatuur in Ukkel was 17,6 °C).
- $^{18}\delta$  in december 2008 = -9,39‰ (de gemiddelde maandtemperatuur in Ukkel was 2,8 °C).

<sup>61</sup> De concentratie van de isotoop wordt gemeten ten opzichte van de concentratie van de meest voorkomende isotoop van het element, en vergeleken met een internationale standaard: de deltawaarde geeft de verhouding tussen het monster en de standaard aan.

<sup>62</sup> Plaatselijke topografie, nabijheid van oppervlaktewaterlichamen, seizoensveranderingen, enz..

<sup>63</sup> Ten opzichte van SMOW

**Tabel 4 - 72: Stabiele isotopen en opgeloste gassen in water van verschillende oorsprong (OM: oppervlaktemonster; P: pompen; Sq: persen; na: niet geanalyseerd; nt: niet van toepassing). SMOW: 'Standard Mean Ocean Water' of internationaal gestandaardiseerd oceaanwater dat als referentie wordt gebruikt; PDB: 'Pee Dee Belemnite' een marien fossiel dat als referentie wordt gebruikt voor <sup>13</sup>C; DIC: 'dissolved inorganic carbon'. Cijfers in cursief geven de standaarddeviatie weer.**

		CO <sub>2</sub> (mg/L)	O <sub>2</sub> (mg/L)	N <sub>2</sub> (mg/L)	CH <sub>4</sub> (mg/L)	H <sub>2</sub> (mg/L)	<sup>18</sup> O (‰ SMOW)	<sup>2</sup> H (‰ SMOW)	<sup>13</sup> C-DIC (‰ PDB)
Neerslag	OM	na/na	na/na	na/na	na/na	na/na	-5,86/4,99	-39,45/30,33	-15,77/1,49
Rivier	OM	na/na	na/na	na/na	na/na	na/na	-6,01/0,74	-42,18/2,43	-11,24/0,35
Mol Boven	P	50/23	1,1/0,3	12,9/0,9	48/59	<0,5/nt	-7,10/0,33	-48,42/1,29	-21,68/1,26
Mol Onder	P	57/54	1,0/0,5	12,5/1,2	58/37	<0,5/nt	-7,28/0,12	-49,33/0,95	-20,87/1,91
Kasterlee	P	20/nt	1,2/nt	11,2/nt	3/nt	<0,5/nt	-6,87/0,08	-46,85/0,49	-19,95/0,63
Kasterlee Klei	Sq	na/na	na/na	na/na	na/na	na/na	-6,71/0,17	-47,55/1,34	-8,26/1,23
Diest	P	22/10	0,8/0,7	12,0/0,7	128/153	<0,5/nt	-6,84/0,31	-47,26/2,25	-19,71/0,90
Berchem	P	1/nt	1,4/nt	11,9/nt	30/nt	<0,5/nt	-7,30/0,11	-51,65/0,35	-16,49/0,10
Berchem	Sq	na/nt	na/nt	na/nt	na/nt	na/nt	-7,04/nt	-51,40/nt	-15,78/nt
Voort/Eigenb	Sq	na/nt	na/nt	na/nt	na/nt	na/nt	-7,07/0,25	-54,75/0,64	-10,59/3,33

Te verwachten <sup>18</sup>δ en <sup>2</sup>δ waarden kunnen worden geschat aan de hand van de empirische verbanden op basis van de gemiddelde jaartemperatuur als voorspellende veranderlijke [R4-176]:

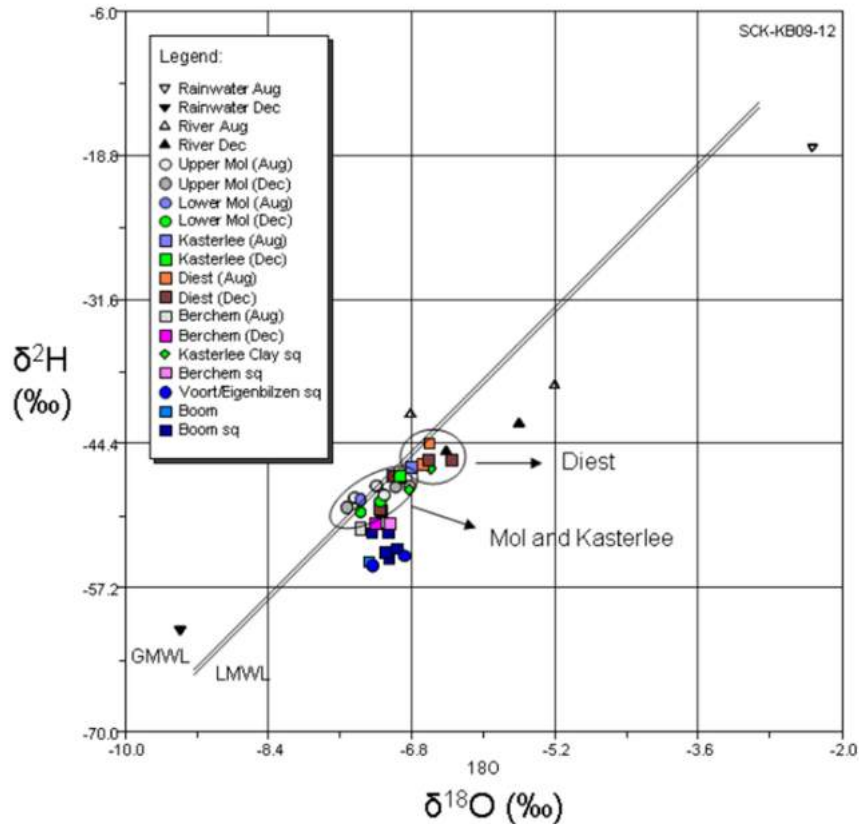
$$^{18}\delta = 0.695 \times T_{annual} - 13.6 \text{‰ SMOW}$$

$$^2\delta = 5.6 \times T_{annual} - 100 \text{‰ SMOW}$$

Wanneer de gemiddelde jaartemperatuur van nabijgelegen stations, i.e. Antwerpen-Deurne (9,6 °C) en Kleine Brogel (9 °C), worden ingevuld, resulteert dit in <sup>18</sup>δ waarden van respectievelijk -6,9‰ en -7,3‰. De bijhorende waarden voor <sup>2</sup>δ zijn respectievelijk -46,2‰ en -49,6‰. Beide punten werden gebruikt om de LMWL te reconstrueren, weergegeven in Figuur 4 - 148. Merk echter op dat afwijkingen van wereldwijde temperatuurrelaties (zie vergelijkingen hierboven) zich voordoen op regionale en lokale schaal als gevolg van fysiografische variaties.

Algemeen lijken alle stalen min of meer verrijkt met <sup>18</sup>O (hogere waarden dan deze van GMWL) of verarmd aan <sup>2</sup>H (lagere waarden dan deze van GMWL). Slechts twee of drie waarnemingspunten staan op of bijna op één van de twee meteorische lijnen. Deze observatiepunten komen van het grondwater van de bovenste watervoerende laag<sup>64</sup>.

<sup>64</sup> Watervoerende laag gelegen boven de Kasterlee Klei.



**Figuur 4 - 148: Stabiele isotopen van waterstof en zuurstof (2H en 18O, uitgedrukt in promille versus standaard) voor grondwaterstalen in piëzometers, uitgeperst grondwater (sq), neerslag- en rivierwater. De gegevens werden verzameld in 2008, gegevens voor de Boomse Klei zijn afkomstig uit [R4-177].**

Het nader bestuderen van Figuur 4 - 148 toont aan dat de isotopische samenstelling verder weg lijkt te schuiven van de meteorische lijnen voor de dieper liggende hydrostratigrafische eenheden. Dit lijkt waar te zijn voor het water van piëzometers en de uitgeperste monsters. Vroegere studies suggereren dat dit te wijten is aan de kleiige aard van de afzetting, vooral in de Voort-Eigenbilzen eenheden, in combinatie met de techniek van het persen: natuurlijk en mechanisch uitpersen van klei zou <sup>2</sup>H-verarming van het poriënwater induceren [R4-177]. Een alternatieve verklaring zou zijn dat sediment-water interacties de isotopensamenstelling hebben beïnvloed, waarbij langere verblijftijden van het water voor de dieper liggende hydrostratigrafische eenheden (Berchem, Voort, Eigenbilzen, Boom) meer uitgesproken interacties mogelijk maken en dus een grotere isotopische uitwisseling met de vaste fase. Omdat zuurstof veel meer aanwezig is in de vaste fase dan waterstof<sup>65</sup>, zouden sediment-water interacties leiden tot een horizontale verschuiving van de meteorische waterlijn naar grotere <sup>18</sup>δ

<sup>65</sup> De mineralogie wordt gedomineerd door Si en O, samen met verschillende hoeveelheden kationen, dit in tegenstelling tot H.



waarden, in plaats van een verticale verschuiving naar lagere  $^2\delta$  waarden. Inzoomen op de gegevens toont het bestaan aan van twee clusters voor de hydrostratigrafische eenheden boven Berchem: één voor de eenheden boven de Kasterlee Klei, en één voor de Zanden van Diest. Het blijkt dat water uit het Mol Zand iets minder verarmd is voor  $^2\text{H}$  en  $^{18}\text{O}$  in vergelijking met water uit de Diest Fm, waar de afwijkingen van de meteorische lijnen groter zijn voor zowel  $^{18}\delta$  en  $^2\delta$ . Merk op dat de twee waarnemingen voor de Zanden van Kasterlee (van ON-Retie-1) binnen de cluster van de Zanden van Diest vallen, waardoor de geochemische analyse wordt bevestigd.

Deze clusters bevestigen de geochemische analyse (bijvoorbeeld Piper-diagram) in termen van het bestaan van verschillende soorten grondwater voor de bovenste en de onderste watervoerende laag. Dit ondersteunt de hypothese dat verschillende grondwaterregimes bestaan in deze watervoerende lagen en dat de Kasterlee Klei een goede regionale hydraulische barrière is.

Stabiele isotopen in het rivierwater werden bepaald voor twee locaties (Witte Nete en Kleine Nete) op monsters van augustus 2008. De stabiele isotopen van zuurstof ( $\delta^{18}\text{O}$ ), waterstof ( $\delta^2\text{H}$  of  $\delta\text{D}$ ) en opgeloste koolstof ( $\delta\text{C}$  DIC) werden gemeten. Voor water wordt volgende internationaal overeengekomen standaard gehanteerd:  $r =$  'Vienna Standard Mean Ocean Water' (VSMOW).

Negatieve waarden van  $\delta$  geven aan dat de betreffende isotoop<sup>66</sup> in mindere mate aanwezig is dan in het referentiemateriaal. Positieve waarden van  $\delta$  refereren naar een grotere aanwezigheid van de isotoop. Tabel 4 - 73 geeft de resultaten weer van de stabiele isotopenanalyse in rivierwater van de Witte en Kleine Nete.

De radioactieve isotopen werden gemeten om een inzicht te krijgen in de achtergrondwaarden van de natuurlijke radioactiviteit (zie ook §16.4.7).

**Tabel 4 - 73: Stabiele isotopen voor rivierwater (n/a = niet geanalyseerd; / = niet van toepassing; SD: standaarddeviatie).**

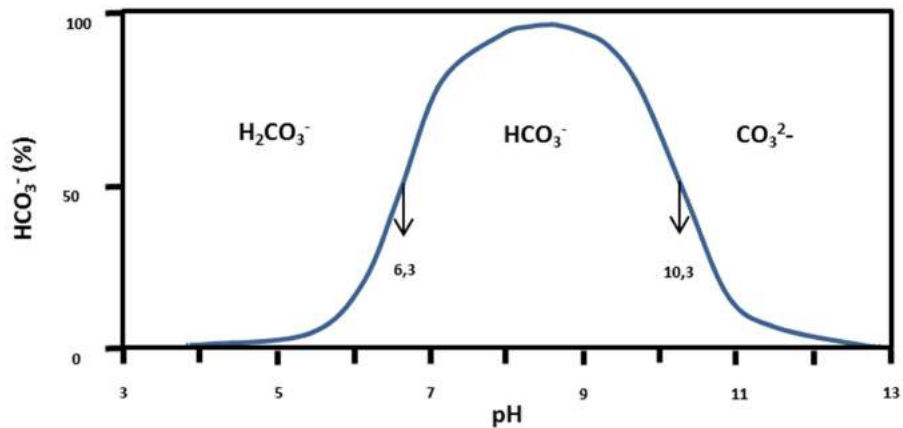
		$^{18}\text{O}$ (‰ SMOW)	$^2\text{H}$ (‰ SMOW)	$^{13}\text{C}$ DIC in ‰ (PDB)
Rivier	gemiddelde	-6,01	-42,18	-11,24
(opp. bemonstering)	SD	0,74	2,43	0,35

#### 4.8.2.2.3 Koolstof-13

Koolstof komt in de natuur voor in de vorm van twee stabiele isotopen,  $^{12}\text{C}$  en  $^{13}\text{C}$ . De  $^{13}\delta\text{C}$  van opgeloste koolstofverbindingen in grondwater is afhankelijk van het  $^{13}\delta\text{C}$  kenmerk van de opgeloste C-bron en de fractionering onder de carbonaatverbindingen in oplossing. Atmosferisch  $\text{CO}_2$  (gas) heeft een  $^{13}\delta\text{C}$  van ongeveer -7 ‰. Wanneer dit  $\text{CO}_2$ (gas) oplost in water, is het aandeel van  $^{13}\text{C}$  iets verarmd, wat resulteert in een  $^{13}\delta\text{C}$  van ongeveer -8 ‰ voor  $\text{CO}_2$ (vloeistof) in rivierwater. Echter, na hydratatie van  $\text{CO}_2$ (vloeistof) wordt de zwaardere isotoop bevoordeeld en produceert een  $^{13}\delta\text{C}$  van ongeveer 2 ‰ in  $\text{HCO}_3^-$ . De totale  $^{13}\delta\text{C}$  van het opgeloste carbonaat is dus afhankelijk van het relatieve aandeel van  $\text{CO}_2$ (vloeistof),  $\text{HCO}_3^-$ , en  $\text{CO}_3^{2-}$ .

<sup>66</sup>  $\delta$  wordt gedefinieerd als de isotopenverhouding van een component toten opzichte van het standard referentiemateriaal.

De  $^{13}\text{C}$  waarden in opgeloste anorganische koolstof (DIC) worden geëvalueerd met betrekking tot de pH. De reden hiervoor is dat de pH wordt gecontroleerd door de  $\text{CO}_2$ -opname van doorsijpeling van water door de bodem en dat de opgeloste anorganische koolstofsoorten (DIC) worden gecontroleerd door de pH (Figuur 4 - 149). De belangrijkste species van anorganische koolstof in de huidige studie zijn  $\text{CO}_2$ (vloeistof),  $\text{H}_2\text{CO}_3$  en  $\text{HCO}_3^-$ . De verhouding van deze species is afhankelijk van de pH.

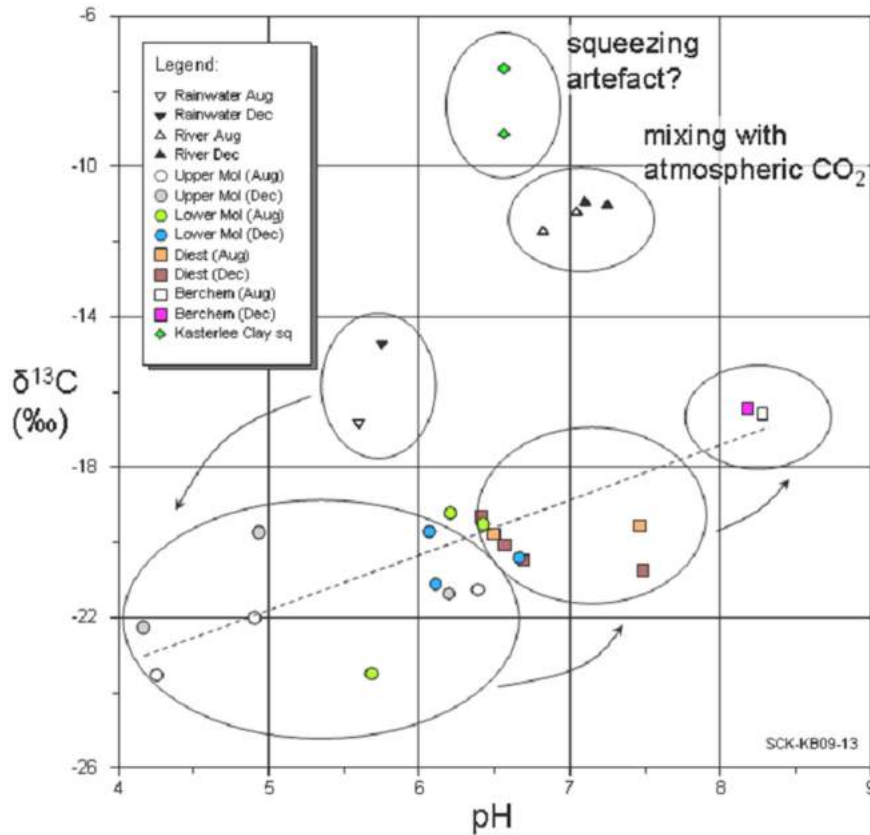


**Figuur 4 - 149: Speciatie van opgeloste koolstof in functie van de pH.**

Figuur 4 - 150 toont aan dat de laagste  $^{13}\text{C}$ -waarden gecorreleerd zijn met lage pH-waarden in een aantal stalen genomen in de bovenste lagen van de Mol Fm. Vertrekkende vanaf neerslagwater, gekenmerkt door een gemiddelde  $^{13}\delta$  van ongeveer -16 ‰ (initiële aanvulling), dalen zowel de pH- en  $^{13}\text{C}$ -waarden richting bovenste watervoerende laag [R4-176]. Dit is te wijten aan het oplossen van  $\text{CO}_2$  in het neerslagwater dat in de bodem infiltreert en zo een daling van de pH-waarde veroorzaakt. Een typische bodem gasvormige fase heeft een  $^{13}\delta$  van ongeveer -24 ‰, als gevolg van  $\text{CO}_2$ (vloeistof). De Zanden van Mol hebben een vergelijkbare lage  $^{13}\delta$  (van -20 tot -24 ‰), bepaald door de samenstelling van het infiltrerende water in de bodem. Dit komt overeen met de algemene vaststelling dat in sedimenten, gedomineerd door silicaat, de DIC niet veel verder evolueert dan de voorwaarden van de bovenliggende grond.

Dieper in de hydrostratigrafie kan het omgekeerde fenomeen worden vastgesteld: de pH neemt geleidelijk toe, waarschijnlijk als gevolg van het  $\text{CO}_2$ -verbruik door verweringsprocessen en/of accumulatie van alkalisch water uit de onderliggende Boomse Klei (volg stippellijn op Figuur 4 - 150). Inderdaad, de  $\text{CO}_2$ -niveaus zijn het hoogst voor de grondwaters met een lage pH, zoals de Zanden van Mol, en omgekeerd zoals voor de Zanden van Berchem (Figuur 4 - 151). Hogere pH-waarden veranderen ook de relatieve verhouding van de verschillende species aan anorganische koolstof, wat resulteert in hogere waarden voor  $\text{HCO}_3^-$ <sup>67</sup>. Ook water uit de Diest Fm heeft een wat hoger Ca- en Mg gehalte dan water uit de Mol Fm.

<sup>67</sup> Water uit Zanden van Diest en Berchem werd gedefinieerd als typisch waterstofcarbonaat



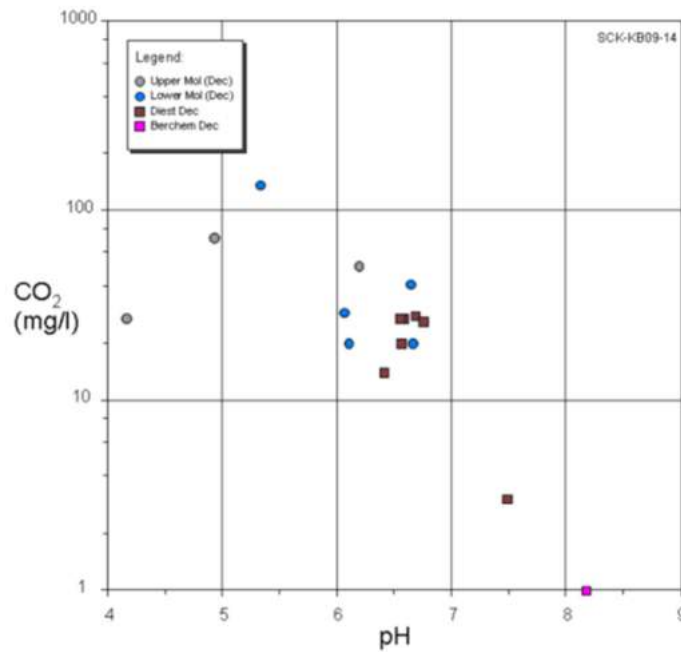
Figuur 4 - 150: Isotoopverhouding van koolstof-13 versus pH voor neerslagwater, rivierwater en grondwater.

Hydratatie van CO<sub>2</sub> (vloeistof) in waterstofcarbonaat veroorzaakt fractionering van <sup>13</sup>C, omdat de zwaardere isotoop de voorkeur krijgt. Dit resulteert in een hogere, of minder negatieve <sup>13</sup>C waarde voor de Zanden van Diest en Berchem. Een ander proces dat kan hebben bijgedragen tot de verrijking van <sup>13</sup>δC is de neerslag van calciet in de Diest en Berchem Fms, volgens de reactie:

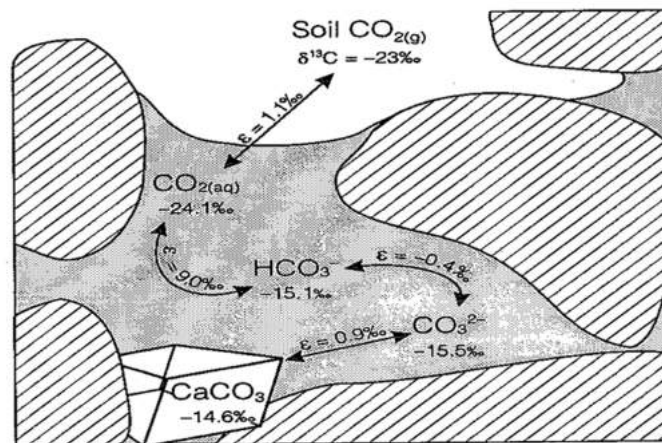


De <sup>13</sup>δC verrijking wanneer calciet neerslaat, is grotendeels te danken aan het ontsnappen van het isotopisch CO<sub>2</sub> dat het totaal aan anorganisch koolstof verrijkt met 9‰, daar waar de neerslag van calciet de totale anorganische koolstof vermindert met slechts -1‰ (Figuur 4 - 152). Het gecombineerde effect van de productie van calciet en CO<sub>2</sub>(g) is 4‰ : (9+(-1))/2, vermits calciet en CO<sub>2</sub> geproduceerd worden in gelijke verhouding.

De resultaten voor de Kasterlee Klei zijn gebaseerd op uitgeperst water en kunnen daardoor niet heel betrouwbaar zijn door de mogelijke fractioneereffecten veroorzaakt door het persproces zelf.



Figuur 4 - 151: CO<sub>2</sub> concentratie in functie van pH voor verschillende grondwaters.



Figuur 4 - 152: Schematische voorstelling van fractionering van <sup>13</sup>δ tijdens uitwisseling van het evenwicht tussen CO<sub>2</sub>, opgeloste anorganische koolstof en calciet bij 25 °C. Voorwaarden van geochemisch evenwicht en verzadiging met calciet worden verondersteld voor het isotopische evenwicht [R4-176].

De rivierwaterstalen tonen relatief hoge  $^{13}\text{C}$  concentraties ten opzichte van de kenmerken van hun belangrijkste bronnen (dit wil zeggen lozing uit de bovenste en de onderste watervoerende lagen). Dergelijke hoge  $^{13}\text{C}$  concentraties kunnen worden toegeschreven aan het mengen met atmosferische  $\text{CO}_2$ . De  $^{13}\delta$  van deze laatste ligt meestal rond -7 ‰ PDB. De bovenstaande analyse toont aan dat de  $^{13}\delta$  gegevens een consistent verhaal over de verschillende soorten grondwater bieden: ondiep grondwater met een lage pH heeft relatief lage  $^{13}\delta$  waarden. Dit is in overeenstemming met de lage hoeveelheden waterstofcarbonaat en carbonaat, terwijl het diepere grondwater (onderste aquifer) met hogere pH-waarde ook hogere  $^{13}\delta$  waarden heeft als gevolg van de hogere mate van hydratatie van  $\text{CO}_2$  (vloeistof), en dus hogere waarden voor waterstofcarbonaat en carbonaat.

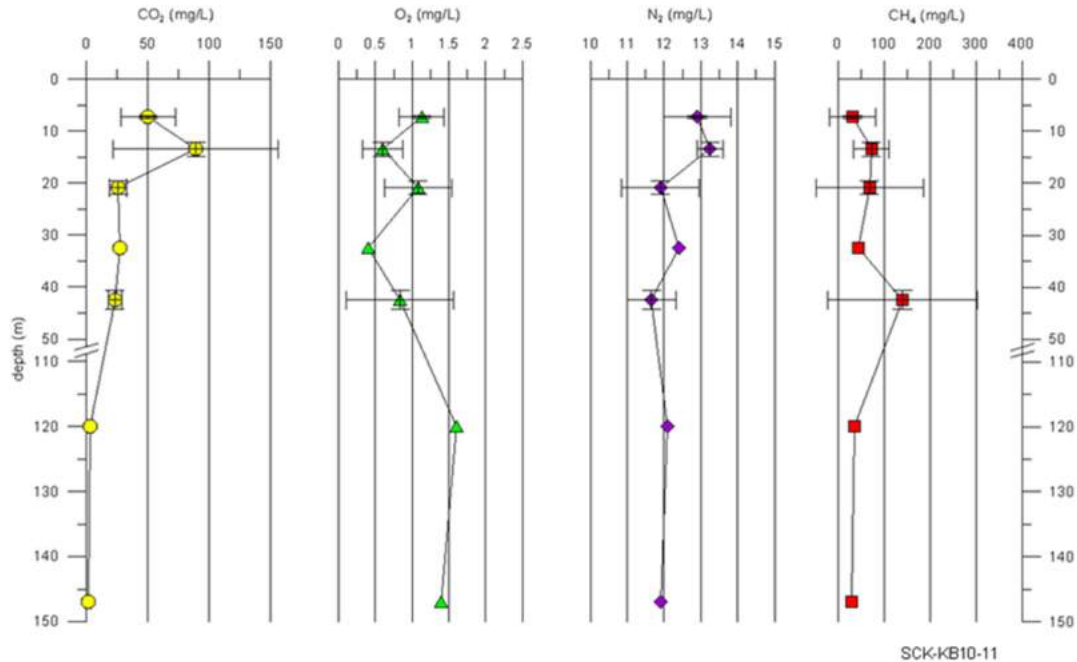
#### 4.8.2.2.4 Opgeloste gassen

Analyse van de opgeloste gassen in het grondwater biedt bijkomende en aanvullende informatie voor een globale beoordeling van de grondwaterchemie. Bijvoorbeeld,  $\text{CO}_2$  is nuttig om de koolstofcyclus in het grondwater te helpen interpreteren, terwijl de opgeloste  $\text{O}_2$  en methaan informatie verschaffen over de redox-voorwaarden in het grondwater (§7.4.3 in [OD-051]).

Verdere analyse van de gegevens is weergegeven in Figuur 4 - 153, waar de gemiddelde waarden worden geprojecteerd in een diepte-concentratie diagram voor elk gas. Inderdaad, de waarden voor koolstofdioxide nemen geleidelijk af met de diepte. Dit hangt samen met de evolutie van de pH. Merk op dat voor een aantal waarnemingen, de onzekerheden relatief groot zijn (tot 100% voor de relatieve standaarddeviatie en meer). Hoewel de verschillen binnen de onzekerheden liggen, lijkt het erop dat diepere grondwaters meer zuurstofrijk zijn. De gemiddelde concentratie van methaan is het hoogste op een diepte van circa 40 m.

Het  $\text{O}_2$ -gehalte is relatief uniform voor de verschillende hydrostratigrafische eenheden, en bedraagt ongeveer 1 mg/L (~ 0,03 mmol/L). Deze laatste waarde is indicatief voor een zuurstofrijke omgeving, dit wil zeggen wanneer de concentratie aan opgeloste  $\text{O}_2$  groter of gelijk is aan  $10^{-6}$  mol/L.

De gegevens voor  $\text{N}_2$  tonen een soortgelijke trend: de waarden lijken gelijkmatig verdeeld over het onderzochte hydrostratigrafische profiel, rond 11-13 mg/L. In tegenstelling hiermee vertoont methaan ( $\text{CH}_4$ ) sterke fluctuaties over de verschillende eenheden. Ze zijn het laagst voor het Kasterlee Zand en het hoogst voor de Diest Fm (tot 300 mg/L). Hoge concentraties van methaan zijn een indicatie voor een anoxische watervoerende laag waar methanogenese kan plaatsvinden. Toch kan methaan worden getransporteerd over lange afstanden door watervoerende lagen en de aanwezigheid ervan betekent niet automatisch dat er methanogenese optreedt op de plaats van staalname.



Figuur 4 - 153: Concentratie van opgeloste gassen CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> (mg/L), uitgemiddeld tot gecombineerde waarden voor de overeenstemmende diepten in de verschillende piëzometers (het gebied van het Lokaal grondwatermodel dekkend). Merk de veranderlijke schalen op de X-as op voor de verschillende gassen.

#### 4.8.2.2.5 Radioactieve isotopen

Metten van de concentratie van radioactieve isotopen is nodig om inzicht te krijgen in de achtergrondwaarden van de natuurlijke radioactiviteit van waterstalen in het gebied Mol-Dessel. Deze waarden dienen als referentie voor de site. Ze zijn ook nuttig voor ouderdomsbepaling en voor het bestuderen van interacties tussen verschillende (grond)waters (§7.4.4 van [OD-051]).

Analyses van radioactieve isotopen zijn gerapporteerd voor <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>36</sup>Cl (vloeistofscintillatietelling), <sup>40</sup>K en <sup>226</sup>Ra (hoge resolutie gamma-spectrometrie), Th en U (ICP-MS).

Th metingen bepalen <sup>232</sup>Th, omdat natuurlijk thorium in wezen bestaat uit één dominant isotoop, met sporen van de andere isotopen [R4-178]. De U-metingen bepalen in hoofdzaak de <sup>238</sup>U isotoop omdat natuurlijk voorkomend uranium nominaal 99,28 gew% <sup>238</sup>U bevat, en slechts 0,71gew % <sup>235</sup>U en 0,0054gew % <sup>234</sup>U [R4-178].

Hoewel <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U, en <sup>226</sup>Ra ook werd gemeten door middel van gamma-spectrometrie, waren alleen voor <sup>226</sup>Ra de resultaten boven de detectielimiet (Tabel 4 - 74). De activiteit van tritium (<sup>3</sup>H), radioactieve koolstof (<sup>14</sup>C) en chloor (<sup>36</sup>Cl) bevinden zich allemaal onder de detectielimiet.

Voor <sup>226</sup>Ra tonen de metingen een duidelijk dalende trend van de activiteit naar de diepere lagen toe. Niet tegenstaande de relatief grote onzekerheden kan worden opgemerkt dat de activiteit voor <sup>226</sup>Ra het hoogst is voor de top van de Mol Fm, en het laagst voor de Berchem Fm. Er zijn twee belangrijke bronnen voor <sup>226</sup>Ra, dat een vervaldochter is in de <sup>238</sup>U keten: oplossing van het matrix-sediment en alfa-terugslag in de oplossing door

radioactief verval van  $^{230}\text{Th}$ . In eerste instantie groeit  $^{226}\text{Ra}$  in en benadert zijn evenwicht na ongeveer 8000 jaar [R4-176]. Hoge  $^{226}\text{Ra}$  concentraties zijn dan een indicatie voor langere grondwater-verblijftijden. Hier zou dit betekenen dat de verblijftijd van het grondwater groter is in de bovenste aquifer dan in de onderste. Dit zou het bestaan impliceren van een belangrijke opwaartse grondwaterstromingscomponent voor de zogenaamde 'onderste watervoerende laag'. Dit is echter niet in overeenstemming met eerdere metingen en resultaten. De hogere radium-concentraties zijn waarschijnlijk het gevolg van lagere sorptie in de bovenste watervoerende laag in vergelijking met de onderste, waardoor meer radium in oplossing wordt gehouden.

De gegevens van de aquifers boven de Boomse Klei die in het kader van het PHYMOL-project werden verzameld zijn gegeven in Tabel 4 - 75 [R4-179]. De tritium-concentraties suggereren dat in Oelegem, waar de Berchem en Mol Fm dichter bij de oppervlakte gesitueerd zijn, tijdens de laatste 60 jaar terug aangevuld zijn. Dit is nog niet het geval waar deze formaties dieper gelegen zijn, zoals in Herentals en Dessel.

**Tabel 4 - 74: Resultaten voor radioactieve isotopen analyses voor verschillende grondwaters. Merk op dat de weergegeven resultaten voor Th en U afkomstig zijn van ICP-MS analyses (na: niet geanalyseerd; nt: niet van toepassing). Neerslag en Kasterlee Klei werden niet geanalyseerd. Cijfers in cursief geven de standaarddeviatie weer. OM: oppervlakte bemonstering; P: bemonstering via oppompen; Sq: bemonstering via persen 'squeezing'.**

8		H-3 (Bq/L)	C-14 (%mod)	Cl-36 (Bq/L)	K-40 (Bq/L)	Th-232 (ppm)	U-238 (ppm)	Ra-226 (mBq/L)
Rivier	OM	na/na	na/na	na/na	na/na	na/na	3,8E-04/9,9E-05	na/na
Mol-boven	P	<6,0/nt	<1,76/nt	<20/nt	<60/nt	1,8E-03/2,0E-03	2,3E-03/1,8E-03	39,2/8,1
Mol-beneden	P	<6,0/nt	<2,21/nt	<20/nt	<60/nt	1,2E-03/1,1E-03	1,1E-03/1,2E-03	25,9/13,3
Kasterlee	P	<6,0/nt	<1,28/nt	<20/nt	<40/nt	2,9E-03/3,4E-03	1,6E-03/1,8E-03	24,8/17,3
Diest	P	<6,0/nt	<1,76/nt	<20/nt	<60/nt	4,9E-04/4,4E-04	2,0E-04/8,0E-05	10,5/1,2
Berchem	P	<6,0/nt	<2,65/nt	<20/nt	<27/nt	5,4E-04/2,8E-05	6,6E-04/3,5E-05	8,2/0,6
Berchem	Sq	na/na					3,3E-03/1,3E-03	na/na
Voort/Eigenb.	Sq					4,4E-04/nt	6,7E-03/4,2E-03	na/na

**Tabel 4 - 75: Tritium concentraties voor verschillende watervoerende lagen op verschillende lokaties [R4-179]**

Locatie	Watervoerende laag	Tritium (H <sub>2</sub> O) T.U.
Mol	Boven-Mol	51,1 ± 2,2
Oelegem	Berchem	55,5 ± 1,9
Herentals	Berchem	1,6 ± 0,5
Dessel	Berchem	1,0 ± 0,4

#### 4.8.3 Achtergrondstraling en radioactiviteit in lucht, grondwater, oppervlaktewater, bodem en sedimenten

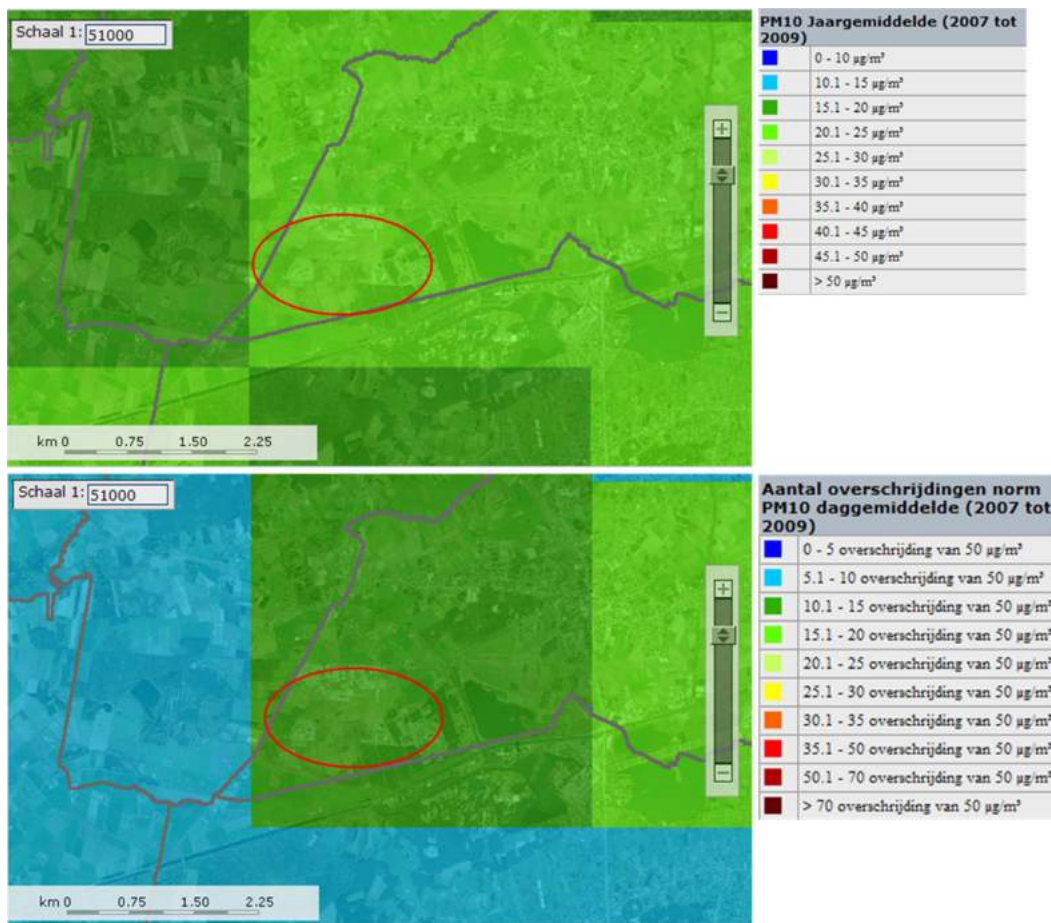
De referentietoestand van de site wat betreft achtergrondstraling en radioactiviteit wordt behandeld in [HS16], en meer bepaald in §16.4.7, Tabel 16-12.

#### 4.8.4 Stofconcentratie in de lucht

Deze paragraaf geeft een overzicht van de verkregen resultaten voor de atmosferische bemonsteringscampagnes in de regio Mol-Dessel.

Gegevens over de stofconcentratie op de site worden vermeld in het milieueffectenrapport [R4-184]. De jaargemiddelde concentratie aan PM10<sup>68</sup> varieert binnen het studiegebied tussen 20,1 en 25 µg/m<sup>3</sup> (Figuur 4 - 154) . In de meetpost Dessel-Nieuwendijk bedroeg de jaargemiddelde concentratie 21 µg/m<sup>3</sup> in 2008 en 26 µg/m<sup>3</sup> in 2009. Ter vergelijking, de jaargrenswaarde voor de bescherming van de gezondheid van de mens bedraagt 40 µg/m<sup>3</sup>. Het betreft een grenswaarde voor het gemiddelde over een jaar.

De daggrenswaarde voor PM10 (50µg/m<sup>3</sup>) wordt binnen het studiegebied 10 tot 15 keer overschreden, afhankelijk van de locatie. De norm van 35 toegelaten overschrijdingen van de PM10 daggrenswaarde wordt dus ruim gerespecteerd.



Figuur 4 - 154: Actuele luchtkwaliteit (studiegebied aangeduid met rode ovaal, grijze lijnen zijn gemeentegrenzen).

Bron: VMM, geoloket RUP

<sup>68</sup> Stofdeeltjes met een aerodynamische diameter van 10 µm of kleiner – de aerodynamische diameter van een stofdeeltje is gelijk aan de diameter van een bolvormig deeltje dat in de omgevingslucht hetzelfde gedrag vertoont als dat stofdeeltje.



## 4.9 Natuurlijke rijkdommen

### 4.9.1 Fossiele brandstoffen

Fossiele brandstoffen worden gevormd door de anaërobe afbraak van begraven organisch materiaal, en zijn typisch verschillende miljoenen jaren oud. Veen, bruinkool, steenkool, aardolie en –gas zijn allen fossiele brandstoffen en een belangrijke energiebron voor de hele wereld.

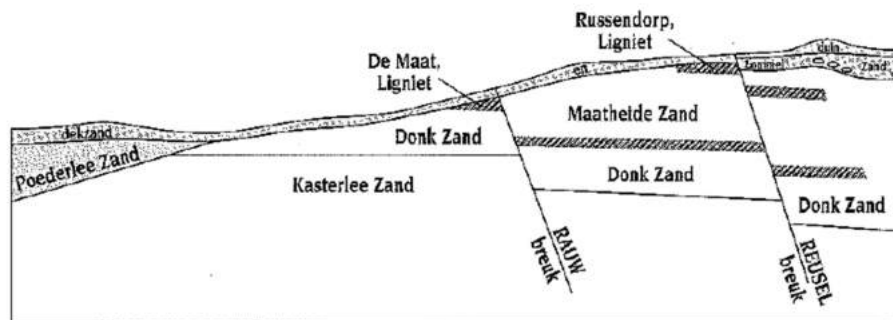
Bepaalde fossiele brandstoffen zijn in het verleden als natuurlijke energiebron in de Kempen ontgonnen. Hieronder volgt een overzicht en hun toekomstig potentieel wordt geëvalueerd.

#### 4.9.1.1 Veen of turf

Veen of turf ontstaat door de afbraak van plantenmateriaal en was vooral in het verleden een belangrijke energiebron. Het accumuleerde in de streek tussen Essen en Postel, dat zeer moerassig was door het voorkomen van de ondiepe ondoorlatende Kempense Klei [R4-188]. Het werd sinds de dertiende eeuw in de streek ontgonnen, de laatste exploitatie in de streek dateert van het einde van de jaren zeventig (Postel).

#### 4.9.1.2 Ligniet of bruinkool

Bruinkool vormt de overgang tussen veen en steenkool en is aanwezig in de Pliocene Mol Fm. Men herkent twee dikkere lagen, zijnde De Maat en de Russendorp Ligniet (Figuur 4 - 155). Het werd intensief ontgonnen tijdens de 20e eeuw in de streek van Mol, ten westen van de breuk van Rauw. Door breukwerking verspringen de twee lignietlagen zich oostwaarts dieper.



Figuur 4 - 155: West-Oost profiel in de streek van Mol [R4-188].

#### 4.9.1.3 Steenkool

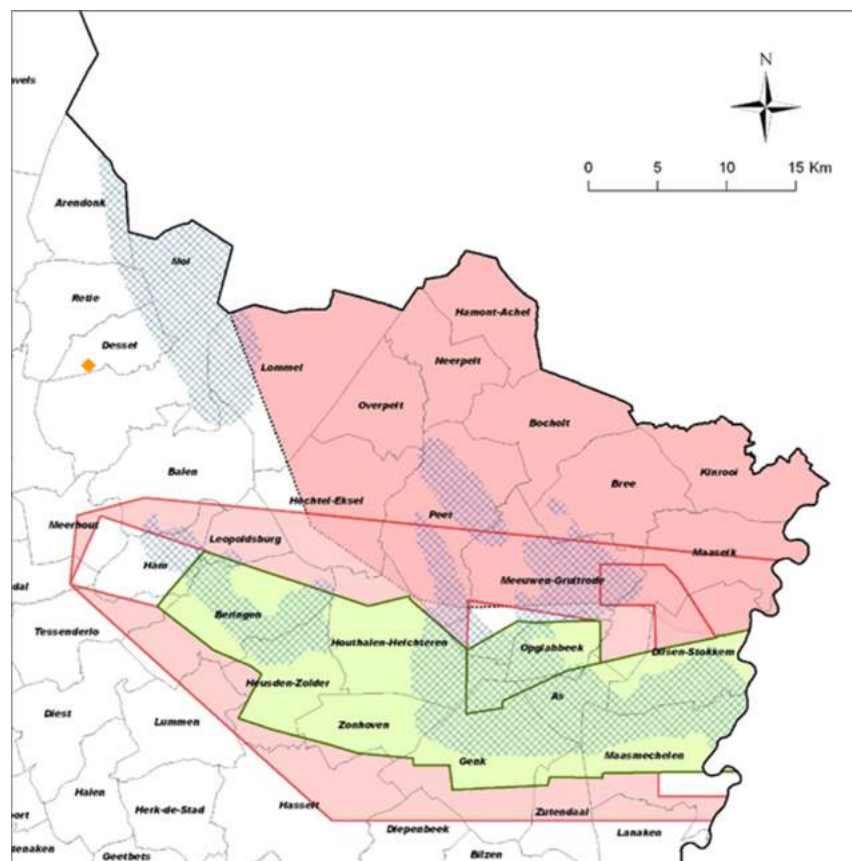
Op 2 augustus 1901 trof A. Dumont de eerste steenkool aan te As. De steenkool is van Westfaliaan-ouderdom. De sequentie is tot 3 000 m dik met een gemiddeld steenkoolgehalte van 3% verdeeld over verschillende lagen.

De ontdekking van steenkool heeft een drastische wijziging gebracht in de economische, sociale en demografische ontwikkeling van Limburg. In 1906 werd aan de vennootschap “Charbonages A. Dumont” een eerste concessie verleend. De eerste steenkool werd te Winterslag in 1914 boven gehaald. Door de goede kwaliteit van de Kempense steenkool groeide de interesse snel en ontstonden op termijn zeven mijnzetels. Ze

werden in 1969 samengesmolten tot de NV Kempense Steenkoolmijnen. Er werd in totaal 440 miljoen ton steenkool ontgonnen tot de definitieve sluiting van de laatste mijn op 30 september 1992 [R4-189].

Een nieuwe exploratiecampagne startte in 1979 ten noorden van de vroegere exploitaties en bracht een reserve aan het licht dat geschat wordt op 4 miljard ton, met een conventioneel ontginbare tonnenmaat van bijna 1 miljard ton (Figuur 4 - 156).

In de streek van Mol-Dessel hebben verkenningsboringen in het begin van de 20e eeuw ook steenkool aangeboord. De steenkoollagen bevonden zich dieper en waren minder dik en minder frequent dan in Limburg, en dus niet interessant voor ontginning.



Figuur 4 - 156: Steenkoolconcessies in in de Oost-Kempen. Groengekleurde gebieden geven de vroegere concessies aan met steenkoolontginning, roodgekleurde gebieden zijn de economisch interessante steenkoolreserves, blauwe zones komen overeen met gebieden met meer dan 250Mm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> methaan (VITO simulatie, [R4-223]). De locatie van de site is weergegeven met een gele ruit.

#### 4.9.1.4 Steenkoolontgassing (*coal bed methane*)

Methaangas (CH<sub>4</sub>) komt voor in de microporiën van steenkool, waar het geabsorbeerd is op de vaste fase. Het is een restproduct van de inkoling van het geaccumuleerde plantenmateriaal. De aanwezigheid van methaangas in steenkool is al lang gekend door de mijnactiviteiten waar het mijngas één van de grote gevaren was van de ontginning. Waar het oorspronkelijk als een soort “afval” werd beschouwd, wordt het nu aanzien als een economisch interessante energiebron. Bij steenkoolontgassing volstaat één boring om, binnen een gebied van 50 ha, het ontgassingsproces op gang te brengen. De steenkoollaag blijft hierbij behouden, zodat het later nog altijd mogelijk blijft om de laag te ontginnen. De totale reserve wordt geschat op 132 miljard m<sup>3</sup>, waarvan ongeveer 65 miljard m<sup>3</sup> economisch ontginbaar zouden zijn [R4-190].

De Limburgse Reconversie Maatschappij (LRM) heeft met private investeerders een samenwerking proberen op te starten om steenkool te gaan ontgassen. Wegens verschuivingen van prioriteiten van geografische en economische aard, hebben deze partners het project met LRM opgedoekt.

#### 4.9.1.5 Olie en gas

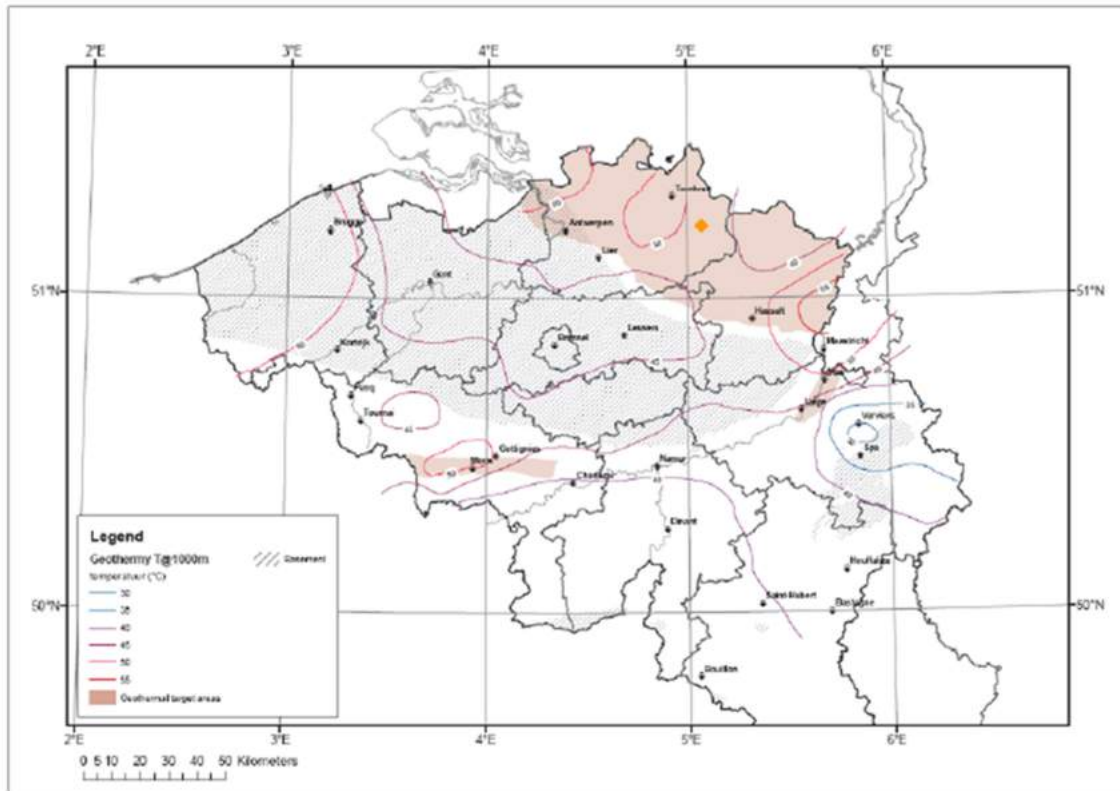
Alhoewel zeer weinig van de meer dan 200 verkenningsboringen in de Kempen voor dit doeleinde werden gepland, werd tot op heden geen aardolie of -gas aangeboord. De geologische structuur en opbouw van de Kempen leent er zich niet toe, maar de afwezigheid van koolwaterstoffen kan niet geheel worden uitgesloten. Het schaarse onderzoek naar koolwaterstoffen in de Kempen spitst zich toe op de Paleozoïsche formaties, waar gezocht wordt naar potentiële brongesteenten of reservoirs.

### 4.9.2 Geothermie als natuurlijke energiebron

De toenemende vraag naar (hernieuwbare) energiebronnen heeft de interesse in geothermie doen heropleven. Uit studies is gebleken dat de Kempen, zowel voor ondiepe als voor diepe geothermie, in aanmerking komt ([R4-191], [R4-192]). Ondiepe geothermie omvat koude-warmte opslag en ondiepe geothermische sondes (tot 300 m); diepe geothermie bestaat uit hydrothermale systemen (open systeem 2 tot 5 km diep), geavanceerde geothermische systemen waarbij het gesteente gefractureerd wordt om watercirculatie te bevorderen, en diepe geothermische sondes (gesloten systeem, 2 tot 3 km diep).

Alhoewel de gemiddelde geothermische gradiënt in Vlaanderen 30°C/km bedraagt, toont de kartering van de temperatuur in de ondergrond aan dat de sedimentaire bekkens, zoals het Kempens Bekken, relatief warmer zijn dan oude massieven (Figuur 4 - 157).

Om water van 25°C (minimale waarde voor geothermische toepassing) of 40°C te bekomen, zijn watervoerende lagen op een diepte van respectievelijk 500 m en 1 000 m nodig. Deze komen ten noorden van het Massief van Brabant enkel in de Kempen voor, waar het Krijt, Buntsandstein (Trias), Neeroeteren Zandsteen (Westfaliaan) en Dinantiaan kalkstenen hiervoor als formatie de gunstige eigenschappen vertonen. Door de beperkte warmteflux echter zal de regeneratie van een geëxploiteerde geothermisch reservoir slechts traag verlopen.



Figuur 4 - 157: Temperaturen in de Belgische ondergrond op 1 000 m diepte ( [R4-191], [R4-192]). De locatie van de site is weergegeven met een gele ruit.

#### 4.9.2.1 Ondiepe geothermie in de regio van de bergingsite

Zelfs in een open warmte-uitwisselingsinstallatie wordt de onttrokken hoeveelheid water enkele tientallen tot honderd meters verder terug in dezelfde watervoerende laag gepompt. De netto waterbalans van zulk systeem is dus gelijk aan nul en het zal geen invloed hebben op de waterstroming of het transport in de omgeving. Enkel het gebied tussen beide putten kan worden beïnvloed door deze onttrekking/inpompings. Indien het systeem thermisch eenzijdig belast zou worden, met andere woorden er wordt enkel warmte onttrokken (en geen warmte terug ingebracht tijdens de warmere seizoenen), zal de watervoerende laag lokaal afkoelen. Deze enkele graden verschil zal een minieme dichtheidsstroming teweegbrengen, die echter totaal verwaarloosbaar is in het hydrogeologisch systeem.

Voor de caissonfabriek wordt ondiepe geothermie voorzien, maar als gesloten systeem. Er zijn hiervoor 12 boringen gepland van ongeveer 80 m diepte. In een gesloten systeem is er hoegenaamd geen enkele beïnvloeding van het hydrogeologisch systeem.

#### 4.9.2.2 Diepe geothermie in de regio van de bergingssite

Momenteel werkt VITO een pilootproject uit om op de Balmatt site te Mol de verdere toepasbaarheid van geothermie te onderzoeken en te evalueren. Het reservoir bevindt zich in de Dinantiaan-kalkstenen, op meer dan 3 500m diepte [R4-193]. De installatie bestaat uit een doublet-systeem, met een productie- en een injectieput. Een bijkomende productieput is gepland voor het najaar van 2018.

Bij een injectieproef, waarbij getest wordt welk debiet onder welke druk terug in de formatie kan worden gepompt, werden meer dan 300 aardbevingen geregistreerd door het seismisch netwerk beheerd door de dienst 'Seismologie' van de Koninklijke Sterrenwacht van België, en meer bepaald door de seismometers die door NIRAS werden geplaatst in de onmiddellijke omgeving van de bergingssite (Figuur 4 - 158). De grootste van deze aardbevingen heeft een lokale magnitude van 0,9, het overgrote deel van de bevingen situeert zich echter tussen ML -0,5 en 0,5.

VITO gaat een seismisch netwerk uitbouwen ten noorden en oosten van de Balmatt site waarbij uitwisseling van gegevens tussen VITO en NIRAS/KSB voorzien is om natuurlijke en geïnduceerde aardbevingen op te volgen.



Figuur 4 - 158: Locatiekaart van de seismometers, in de boring 'Smet-Fish' (DSL) en in HADES-URF (MOLT), met op beide sites ook een seismometer aan de oppervlakte (DLS & MOLS).

### 4.9.3 Gasopslag

Diepe geologische lagen kunnen als natuurlijke reservoirs gebruikt worden voor de opslag van gas. Hierbij kunnen twee gevallen onderscheiden worden: de seizoenopslag van aardgas voor consumptie en de langetermijn opslag van CO<sub>2</sub> om het aandeel aan broeikasgassen te verminderen.

#### 4.9.3.1 Opslag van natuurlijk aardgas

Natuurlijk aardgas kan voor onbepaalde tijd worden opgeslagen in een reservoirgesteente zoals een ontgonnen aardgasveld, zoutkoepels of aquifers. In de Kempen wordt een koepelvormige structuur in de Viseaan kalksteen te Loenhout (“koepel van Heibaart”) uitgebaat voor seizoenale gasopslag door FLUXYS [R4-194].

De koepel van Heibaart bevindt zich op een hoger gelegen blok dat begrensd wordt door NNW-SSE georiënteerde slenken. De top bevindt zich op -1 080 m TAW, en wordt bedekt door de afsluitende verharde kleistenen van het Namuriaan. De kalksteenmatrix zelf heeft geen reservoir eigenschappen, maar door de karstificatie ervan (verwerking bij emersie) is een belangrijke macro-permeabiliteit (spletten en holten) ontstaan die tussen 40 en 50 mD<sup>69</sup> bedraagt [R4-195]. De huidige capaciteit bedraagt ongeveer 700 Mm<sup>3</sup>.

#### 4.9.3.2 CO<sub>2</sub> opslag

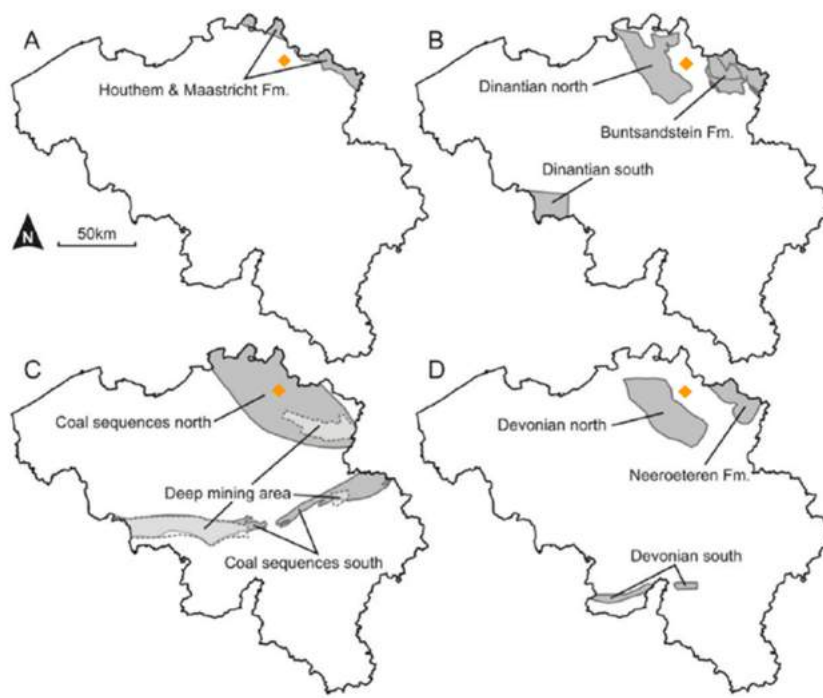
CCS (*carbon capture & storage*) is een middel om de uitstoot van broeikasgassen, en meer bepaald van CO<sub>2</sub>, te beperken door het op te slaan in ondergrondse reservoirs. Doel is om CO<sub>2</sub> te capteren van grote productiebronnen, zoals een thermische electriciteitscentrale, deze te transporteren naar de opslagsite en het daar op te slaan zodat het niet in de atmosfeer kan vrijkomen [R4-196].

Voor de geologische opslag van CO<sub>2</sub> komen lege olie- en gasreservoirs in aanmerking, alsook diepe *saline aquifers* en steenkoollagen<sup>70</sup> en –mijnen [R4-197]. Om koolstofdioxide in een vloeibare of superkritische fase te kunnen opslaan, is minimum 800 m diepte nodig. Boven het reservoir is ook een afsluitende formatie nodig. Bijkomende ‘trapping’ wordt verkregen door capillaire krachten, dissolutie in het formatiewater en mineraalprecipitatie.

Op basis van de hierboven besproken voorwaarden om CCS te kunnen uitvoeren, komen in België de volgende stratigrafische intervals in aanmerking: carbonaatgesteenten van het Onder-Karboon en van het Boven-Krijt/Paleoceen, zandstenen van het Boven-Karboon en van het Trias, en de steenkoolhoudende formaties (Figuur 4 - 159). In de Kempen zijn al deze formaties aanwezig [R4-198]. Hun potentieel voor CCS is echter sterk verschillend, het minst voor de carbonaten van Boven-Krijt/Paleoceen ouderdom, en een hoge mogelijkheid voor de Buntsandstein en de Karboon kalkstenen. Naast de aquifers biedt de opslag in de steenkoollagen van de Kempen en in Wallonië (waar ze diep genoeg zijn) eveneens mogelijkheden, indien aan een aantal technische voorwaarden kan worden voldaan. CCS in steenkool zou kunnen gecombineerd worden met steenkoolontgassing: men vervangt het geëxploiteerde methaan door koolstofdioxide.

<sup>69</sup> Tussen 4,10<sup>-14</sup> en 5,10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup>

<sup>70</sup> Koolstofdioxide wordt door de steenkool geabsorbeerd.



Figuur 4 - 159: Potentiële locaties voor CCS in België. A: Houthem en Maastricht calcarenieten (Krijt-Palaeocene poreuze carbonaatgesteenten); B: de Buntsandstein zandstenen (Trias) en de Dinantiaan carbonaten; C: de steenkoolhoudende formaties en de diepe mijnzones; D: de Neeroeteren zandsteen (Westfaliaan D) en de Devoon kalkstenen (uit [R4-198]). De locatie van de site is aangeduid door middel van een gele ruit.

#### 4.9.4 Delfstoffen

De hieronder beschreven tekst is gebaseerd op [R4-188] en [R4-199].

##### 4.9.4.1 Keramische delfstoffen

Klei en leem vormen, wegens hun plastische eigenschappen, de belangrijkste traditionele keramische grondstoffen. Ze worden verwerkt tot allerlei bakproducten zoals bakstenen, tegels, dakpannen en draineerbuizen.

De Ieperiaan-kleien komen in heel Vlaanderen voor met uitzondering van Oost- en Zuid-Limburg. Ze worden intensief ontgonnen in het zuiden van West-Vlaanderen waar ze dagzomen. In de Kempen komen deze kleien in de ondergrond voor, in de streek van Mol-Dessel ligt de basis op een diepte van ongeveer 450 m. Ten oosten van de Schelde gaat één van de leden, meer bepaald de Klei van Moen, geleidelijkaan over in een zandiger facies (Zand van Mons-en Pévèle).

De Boomse Klei (Oligoceen) wordt ontgonnen in de Rupelstreek, en komt overal voor in de ondergrond van de Kempen. De klei wordt intensief bestudeerd in het kader van de berging van het B & C programma van NIRAS. Op het SCK•CEN te Mol werd een ondergronds laboratorium in deze klei uitgegraven op een diepte van 225 m.

De Quartaire kleien van de Kempen komen in de Noorderkempen voor. De economische rendabele zone situeert zich ten noorden van de Kempense microcuesta, die tussen St-Job-in-'t Goor en Turnhout voorkomt.

Verder komen nog kleinere klei- of leemformaties voor, beperkt in dikte en/of verspreiding, zoals de polderklei, de Asse Klei, de Henis Klei, en eolische en alluviale leem.

Sedert de Napoleonistische wetgeving werd kleiwinning als een activiteit van algemeen belang erkend, met tot in 1995 een speciale wetgeving die afweek van die van de andere delfstoffen. Door de gewijzigde productiemethodes, een automatisering op alle niveaus, werd de duur van het verwerkingsproces drastisch ingekort waardoor de productiecapaciteit stelselmatig toenam en men aan de strengere kwaliteitseisen kon voldoen. Dit ging samen met een schaalvergroting van de bedrijven en een drastische vermindering van de tewerkstelling. De verwerkingseenheden zijn vandaag niet noodzakelijk meer geografisch aan de nabijheid van de ontginning gekoppeld. Aanvoer van grondstoffen om de ongeveer 2,5 miljoen ton steen jaarlijks te produceren en de uitvoer ervan, blijft vandaag de dag niet beperkt tot de lokale omgeving.

##### 4.9.4.2 Bouwzand

Belgische normen beschrijven de grenzen waarbinnen de eigenschappen van een zand zich dienen te bevinden voor een bepaald gebruik. Variabelen hierbij zijn de korrelgrootteverdeling, kritische onzuiverheden, het vulstofgehalte en soms ook de gelijkvormigheid.

Zand komt in bijna heel Vlaanderen voor aan de oppervlakte. Voor WO II was zandwinning vooral een erg lokale aangelegenheid. Door de hoge vlucht van de bouwsector en de toegenomen transportmogelijkheden en mechanisering, en nieuwe visies op milieu en landinrichting, zijn de winningsactiviteiten in een kleiner aantal, maar grootschaligere ontginningen geconcentreerd. Ophoogzand wordt verspreid ontgonnen over het hele Vlaamse territorium omdat dit aan de minste kwaliteitseisen moet voldoen. Betonzand en metselzand worden voornamelijk in de provincie Limburg en ook nog in Vlaams-Brabant ontgonnen. Deze voorraden kunnen niet aan



de vraag voldoen, en beton- en metselzand moeten worden ingevoerd vanuit Nederland en de Noordzee. De jaarlijkse productie van zand bedraagt in Vlaanderen ongeveer 10 Mton.

#### 4.9.4.3 Grove granulaten

Grove granulaten worden voornamelijk gebruikt in de burgerlijke bouwkunde als hoofdcomponent van beton, als ballastmateriaal voor spoorwegen, als component van bitumineuze mengsels, voor wegverhardingen,... Men deelt de natuurlijke granulaten in volgens hun vorm, rond of gebroken. Ze worden ontgonnen in de Noordzee, in het Schelde en het Maasbekken.

In de Noordzee komt het grind voor in de geulen tussen de Vlaamse Banken, waar het enkele meters dik kan zijn. De totale reserve wordt geraamd op 1 miljard m<sup>3</sup> waarvan 10% gemakkelijk ontginbaar is.

In het Scheldebekken komt aan de basis van het Quartair een decimeter-dikke grindlaag voor. Verder bevinden dikkere lagen riviergrind zich op de bodem van de huidige dalen van Midden-België, en in de diverse terrassen. Door de ondiepe insnijding van de rivieren van het Netebekken in de Tertiaire lagen, is hier slechts sporadisch grind te vinden.

In het Maasbekken komt “berggrind” voor op het Kempens Plateau, “valleigrind” in de Maasvallei. Door de afwezigheid van nieuwe ontginningsgebieden is de productie fel afgenomen.

De laatste 10 jaar is de hoeveelheid grindproductie nagenoeg constant gebleven, en bedraagt het ongeveer 1 000 kTon per jaar [R4-200].

#### 4.9.4.4 Ertsen

Door de hoogwaardige kwaliteit van de Mol Zanden en het Zilverzand van Opgrimbie worden deze beschouwd als een erts. Deze eersten komen ook al aan bod in §4.3.3.1.1.

De eerste officiële ontginning van de Mol Zanden dateert van rond 1862, te Donk en Gompel.

Deze zanden komen in drie zones voor. De eerste zone is het oude ontginningsgebied van Boeretang tot Rauw, scherp begrensd in het noorden en zuiden. Het Donk Zand is er tot 25 m dik (Figuur 4 - 43). De tweede zone strekt zich uit oostwaarts van de breuk van Rauw, waar het Donk Zand minstens 15 m dieper is weggezakt, samen met de Ligniet van De Maat (Figuur 4 - 155). Hierop rust het Maatheide Zand, dat in tegenstelling tot het Donk Zand meer humusrijke horizonten omvat. Oostwaarts van de breuk van Reusel is het Mol Zand moeilijker te ontginnen, omdat ze in deze zone bedekt is door dikkere jongere lagen.

Het zand wordt onder water opgezogen via een zuigbuis (25 m diep) en wordt via pijpleidingen naar Dessel gevoerd. Op het bedrijf wordt het zand gespoeld en gezeefd. Voor de productie van 1 ton zand wordt 5 ton grondwater gebruikt (± 19 miljoen m<sup>3</sup> water per jaar)

Hoewel het Mol Zand in Dessel zeer zuiver is, situeert de productie van zand voor de glasindustrie zich echter in Lommel. De lokale zandwinning bedraagt ongeveer 700 000 ton per jaar en wordt voor 50% gebruikt in bouwmaterialen (productie van tegelmortel, egalisatiemortel, sierpleister, cementgebonden panelen, ceramische producten, bakstenen ...), 20% voor glasvezel productie, 20% voor eigen productie (omzetting van kwarts naar

crystaliet), 5% als vormzand voor gieterijen en non-ferro metaal raffinage en nog 5% diversen (o.a. silicium carbide).

De afbakening van het onderzoeksgebied voor nieuwe ontginning situeert zich in de ruime omgeving van Postel [R4-201]. Het gebied bevindt zich in grote lijnen tussen de kanalen Dessel-Turnhout-Schoten en Bocholt-Herentals, de grens met Limburg en Nederland en in het noorden de N123. De meest westelijke zandwinning ligt aan de Gravenstraat, tegenover de site van Belgoproces, op ongeveer 1 kilometer van de bergingssite. De dikte van het Mol zand op de site zelf dat ontginbaar wordt geacht, bedraagt een twintigtal meters [R4-202].

Het Zilverzand van Opgrimbie is ontstaan door de volledige uitloging van glauconiet, veldspaten en de meeste zware mineralen door humuszuren. Die enorme hoeveelheid humuszuren kwam tot stand door bijeengespoeld drijfhout in lagunes en stilstaand water. Het Zilverzand, één van de zuiverste kwartszanden ter wereld, is moeilijk ontginbaar doordat het bedekt wordt door sedimenten met een dikte van meer dan twintig meter.

## 4.10 Algemene beschrijving van de biosfeer

### 4.10.1 Situering van het studiegebied

Het studiegebied ligt in de centrale Kempen (§4.2.1) met de Kleine en Grote Netevalleien die een belangrijke rol spelen in de huidige landschapspatronen. Die zijn samengesteld uit vele kleine landschapselementen en vochtige depressies met hoge tot zeer hoge biologische waarde [R4-203].

De huidige ecosystemen in de regio Mol/Dessel zijn sterk beïnvloed door veranderend landgebruik en -beheer over honderden jaren, en het kan worden verwacht dat ecosystemen zullen blijven evolueren in de toekomst. Algemeen kan het variërende landschap onderverdeeld worden in landbouwgrond, weiland en gecultiveerde dennenbossen. De laatste zijn die gebieden waar de bodem ongeschikt was voor landbouw. De bossen huisvesten vogels en kleine zoogdieren. In de buurt van waterplassen en vijvers is een diversiteit aan vogels aanwezig. In de beken en rivieren leven verschillende soorten vissen. Weilanden worden hoofdzakelijk begraasd door melkvee.

Opgemerkt dient te worden dat een ecologisch onderzoek (flora en fauna) in de nabijheid van de toekomstige bergingsite is uitgevoerd in het kader van de voorbereidende werkzaamheden voor het milieueffectrapport [R4-204]. Dit omvat:

- het in kaart brengen van de ecotoop;
- het opstellen van een vegetatiekaart en het in kaart brengen van zeldzame plantensoorten;
- een onderzoek van de fauna: vogels, zoogdieren, amfibieën en reptielen, vissen, dagvlinders, libellen, sprinkhanen, lieveheersbeestjes, loopkevers, spinnen, mieren, macrofauna<sup>71</sup>, en andere ongewervelden.

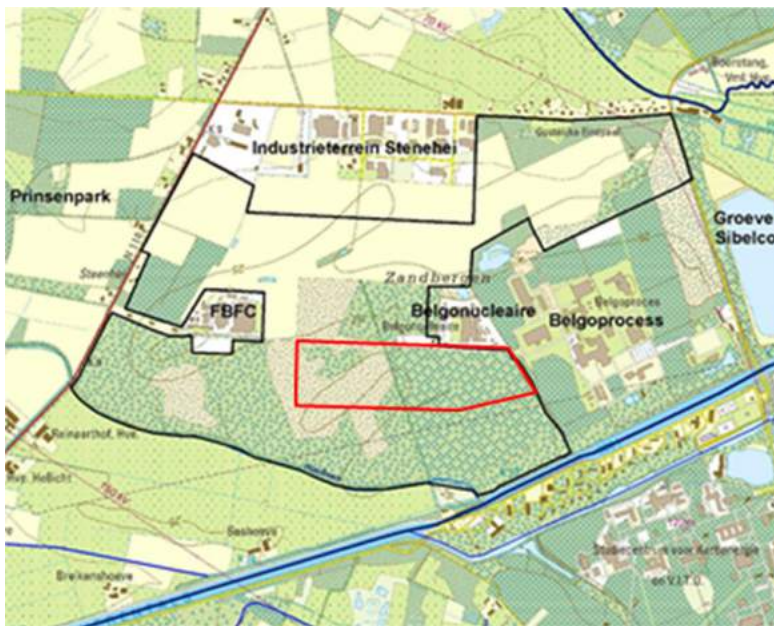
Enkele resultaten van deze studie zijn hier opgenomen, voor meer details wordt verwezen naar [R4-204]. Een kaart van de site en haar omgeving, zoals beschouwd in het ecologisch onderzoek, is weergegeven in Figuur 4 - 160). Het studiegebied is voornamelijk gelegen op het grondgebied van de gemeente Dessel, en deels op dat van Mol.

In de omgeving van de toekomstige bergingsite worden ruwweg vier verschillende ecosystemen herkend. Het zuidoostelijke gebied, ten zuiden van Belgonucleaire, is bosrijk met gecultiveerde naaldbossen zonder variatie. Het grootste deel van het gebied wordt ingenomen door het pijpenstrootje begraste heide, dat echter snel opnieuw naar bos of woud evolueert. Ten westen van Belgonucleaire en ten noorden van Belgoprocess zijn kleine duinformaties aanwezig ('Zandbergen'). In het noorden en noordoosten van de site is het gebied voornamelijk ingevuld met agrarische velden en rogge-grasland.

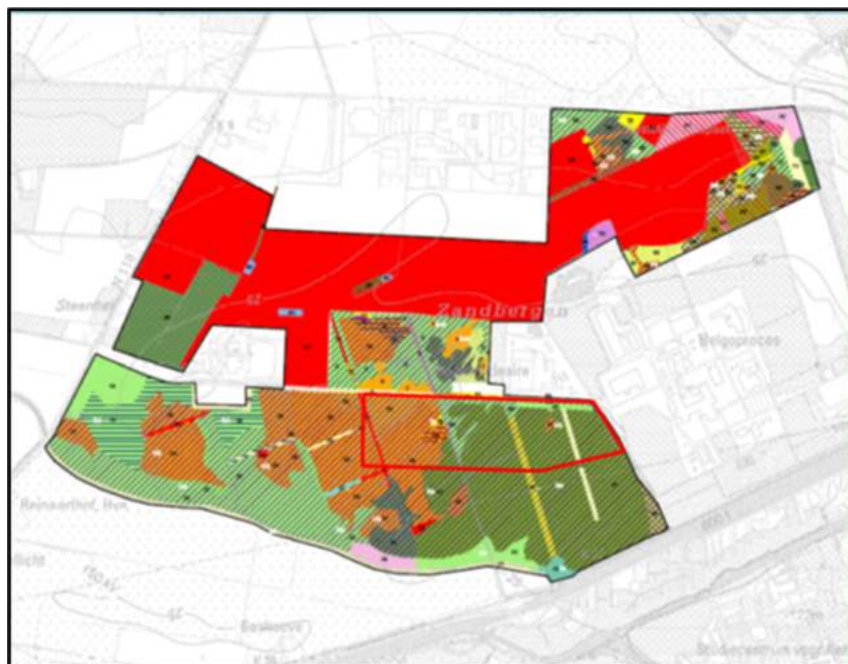
Met het oog om een vegetatie-grafiek samen te stellen, werd het studiegebied opgedeeld in 90 vegetatie polygonen, aangeduid met 21 vegetatietypen (Figuur 4 - 161). Deze verschillende vegetatietypes worden in detail beschreven in de ecologische onderzoeksstudie [R4-204]. In de volgende paragrafen worden de verschillende ecosystemen kort beschreven.

---

<sup>71</sup> De Belgische Biotische Index (BBI) wordt bepaald op basis van de aanwezigheid of afwezigheid van macro-invertebraten. De BBI wordt gebruikt om de biologische waterkwaliteit te beoordelen (zowel wat de waterkwaliteit betreft als de kwaliteit ervan als biotoop).



Figuur 4 - 160: De bergingssite te Dessel en haar omgeving. Het studiegebied voor de ecologische inventarisatie is zwart omlijnd (overgenomen uit [R4-204]), de bergingssite in het rood.



Figuur 4 - 161: Vegetatiekaart van de omgeving van de bergingssite. De groene gebieden geven de verschillende soorten bebossing weer, de oranje gebieden de verschillende soorten heide. Agrarische gebieden (met inbegrip van de weilanden) zijn rood gearceerd [R4-204].

#### 4.10.2 Natuurlijke systemen

Er kunnen bijna geen natuurlijke systemen worden gevonden in de regio van de site te Dessel. Het merendeel van de gematigde loofbossen werd gekapt in de 14<sup>e</sup> eeuw. Het land veranderde in heide en grasland, waarop schapen en runderen graasden. Schapenteelt was de belangrijkste activiteit tijdens de 15<sup>e</sup> en 16<sup>e</sup> eeuw. Vanaf de 17<sup>e</sup> eeuw werden grote delen van het gebied herbebost. Enkele grote bosbranden in het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw verwoestten belangrijke bosgebieden. Deze gebieden werden niet herbebost, maar werden omgezet in landbouwgrond. In de 20<sup>e</sup> eeuw werden snel groeiende soorten grenen, zoals de grove den en de Corsicaanse den, aangeplant voor gebruik in de mijnbouw en de steenbakkerijen (zie ook §4.10.3). Tot op heden bestaat deze situatie.

Ook rivieren in de omgeving worden om de 5 jaar uitgebaggerd en kunnen als dusdanig niet worden beschouwd als echte natuurlijke ecosystemen [R4-193] [R4-204], [R4-205], [R4-206].

#### 4.10.3 Semi-natuurlijke systemen

##### 4.10.3.1 Bossen

21,9 % van België is bebost. Hiervan ligt enkel 8,3 % in Vlaanderen en dan vooral in het noordelijke deel. De meest voorkomende boomsoorten in dit deel zijn loofbomen (49,8%), gevolgd door 39,1% naaldbossen, 6,3 % zijn gemengde naaldbossen en 4,9% zijn gemengde loofbossen. De meest voorkomende loofboomsoort is de populier. Deze is vooral te vinden in grote alluviale valleien. De tweede en derde meest voorkomende boomsoorten zijn respectievelijk eik en beuk [R4-207].

Het merendeel van de *naaldbossen* wordt gevonden in de Kempen, waarvan 78,3% minder dan 60 jaar oud zijn. De snel groeiende soorten grenen, zoals de grove den (*Pinus sylvestris L.*) en de Corsicaanse den (*Pinus nigra var. Corsicana*), werden voornamelijk gebruikt in de mijnbouw en de steenbakkerijen in de 20<sup>e</sup> eeuw. Ook de duinen zijn beplant met naaldbomen [R4-206]. Loofbomen in de omgeving zijn de berk (*Betula sp.*), maar eveneens eik (*Quercus sp.*), beuk (*Fagus*) en enkele esbomen (*Fraxinus excelsior L.*).

Bramen (*Rubus sp.*) en bosbessen (*Vaccinium myrtillus L.*), waarvan de bessen soms worden geplukt voor menselijke consumptie, groeien op sommige plaatsen in deze bossen.

Andere veel voorkomende plantensoorten in de omgeving van de site zijn korstmossen, buntgras (*Corynephorus canescens L.*), tandjesgras (*Danthonia decumbens L.*), borstelgras (*Nardus stricta L.*), gewoon struisgras (*Agrostis capillaris L.*), schapenzuring (*Rumex acetosella L.*), tormentil (*Potentilla erecta.*), koningsvaren (*Osmunda regalis*), maar ook zeldzame grassoorten zoals liggende vleugeltjesbloem (*Polygala serpyllifolia*), behaard breukkruid (*Herniaria hirsuta*), zandblauwtje (*Jasione montana*) en bosdroogbloem (*Gnaphalium sylvaticum*).

##### 4.10.3.2 Heide

Enkele eeuwen geleden werden grote delen van de Kempen omgezet in heide als gevolg van ontbossing. Tot op de dag van vandaag blijven hiervan nog grote delen over en hebben een belangrijke biologische en historisch-culturele waarde (zie eveneens Figuur 4 - 163 in §4.10.4). Deze antropogene heidevelden werden langzaam opnieuw bos of houtland. Op de droge gronden in de regio van Mol en Dessel is de meest voorkomende soort struikheide (*Calluna vulgaris (L. Hull.)*).

#### 4.10.3.3 Drassig land

In de omgeving van de site te Dessel kunnen een paar kleine drassige gebieden (natte heide) worden gevonden. Nauw verwant aan drassig land zijn vennen. In deze biotopen zijn veel plantensoorten aanwezig. We vermelden alleen de eetbare kleine veenbes (*Vaccinium oxycoccus* L.) [R4-204].

Ook 's *Gravendel* is een opmerkelijk veengebied met spectaculaire en uiterst zeldzame vegetatie (klokjesgentiaan, gouden beenbreek, gewoon veenpluis, enzovoort). Het is net ten noordoosten van het Prinsenspark gelegen, vlakbij de monding van de Witte Nete in de Kleine Nete in de gemeente Retie.

#### 4.10.3.4 Bijzondere plantensoorten

In de omgeving komen ook een reeks bijzondere plantensoorten voor. Hierin is het zeer opvallend dat het overgrote deel van de bijzondere soorten op de paden of in de marge van de percelen groeit. Dit is te verklaren doordat net op die plaatsen de monotone pijpenstrootjes- of heidevegetaties onderbroken worden en er open plekjes aanwezig zijn voor minder concurrentiekrachtige (en daarom vaak zeldzamere) soorten. Ook is het zo dat bij bosvegetaties de meest bijzondere flora meestal langs de paden wordt gevonden, omdat hier net iets meer lichtinval is. Qua flora zijn de bermen van de Europalaan de meest waardevolle zones binnen het studiegebied: een tiental aandachtsoorten is hierin aanwezig, waarvan meerdere in hoge getale. Het betreft dwergviltkruid (*Filago minima*), éénjarige hardbloem (*Scleranthus annuus*), gewone dophei (*Erica tetralix*), hazenzegge (*Carex ovalis*), koningsvaren (*Osmunda regalis*), kruipbrem (*Genista pilosa*), kruipwilg (*Salix repens*), liggende vleugeltjesbloem (*Polygala serpyllifolia*), stekelbrem (*Genista anglica*), tormentil (*Potentilla erecta*) en trekruis (*Juncus squarrosus*).

Andere waardevolle vegetaties zijn te vinden in de onmiddellijke omgeving van de duinen nabij de parking van Belgonucleaire en ten noorden van Belgoproces. Het gaat om in Vlaanderen zeer zeldzame vegetatietypes, die zelfs op Europees niveau bedreigd en beschermd zijn, zoals heischraal grasland, buntgrasvegetaties, vochtige en droge heide. De brede, gemaaide paden door de heide zijn zeer waardevol, voor zover ze niet te sterk zijn verstoord of ingezaaid omwille van jachtdoeleinden. Het inzaaien van de waardevolle paden in het heidegebied als wildakker heeft vanuit botanisch oogpunt een zeer negatieve impact. Een aanzienlijk deel van de heide is matig tot sterk vergrast met pijpenstrootje, waardoor de botanische waarde afneemt.

Wat betreft de bossen is de waarde vrij beperkt. Er zijn geen oud-bosplanten aanwezig. Het naaldbos is zeer monotoon qua leeftijdsopbouw en ondergroei. Wel vermeldenswaardig zijn de paden door het naaldbos, waarin soorten van droog heischraal grasland plaatselijk goed vertegenwoordigd zijn. De jonge loofhoutopslag is interessant qua soortensamenstelling maar heeft voorlopig nog nauwelijks een 'boskarakter'. Immers, het betreft sterk verboste heide, die zich tot ongeveer 10 tot 20 jaar geleden nog in een eerder stadium van de vegetatiesuccessie bevond, namelijk 'heide', maar momenteel op basis van soortensamenstelling als eikenberkenbos dient beschouwd te worden. De minst waardevolle vegetaties zijn momenteel de grote akkers. Plaatselijk stellen we een sterke toename van 'agressieve exoten' vast, zoals Amerikaanse vogelkers en Amerikaanse eik, vooral in het noordoosten van het studiegebied. Deze vormen een bedreiging voor de bovenvermelde, waardevolle ecotopen.

#### 4.10.3.5 Gemeenschappelijke fauna in de omgeving van de site te Dessel

Naast bomen en planten die in eerdere paragrafen werden vermeld, leven er ook verschillende diersoorten in de nabijheid van de toekomstige bergingssite [R4-204]. We beperken ons hier hoofdzakelijk tot het vermelden van de relevante soorten die als referentie-organismen genomen worden in de modellering van de biosfeer [OD-117].

##### 4.10.3.5.1 Zoogdieren

Konijnen en rode eekhoorns zijn vaak voorkomende zoogdieren, maar ook hazen, vossen en reeën kunnen worden opgemerkt. De aanwezigheid van konijnen is van cruciaal belang voor het behoud van de bestaande biodiversiteit, omdat er geen specifiek beheer van de heide is in de regio (afgezien van het maaien van paden).

Van deze zoogdieren wordt op konijnen, hazen en reeën gejaagd tijdens het jachtseizoen (september tot januari).

Dat er hoge dichtheden konijn aanwezig zijn in het studiegebied, blijkt duidelijk aan de vegetatiestructuur: op de ruggen van de rabatten worden plekken kort gegraasd door konijnen waardoor een mooie variatie in vegetatiestructuur aanwezig is. Tijdens een avondobservatie (15/07/2008) in het agrarisch gebied Steenheide zijn 15 hazen waargenomen. De aanwezigheid van de vos is vastgesteld door de ontdekking van een burcht met verse sporen en uitwerpselen, midden in de centrale pijpenstroheide. De reewildstand in het studiegebied is in de zomer 2008 ingeschat op 4 bokken, 5 geiten en 6 reekalveren<sup>72</sup> in het centraal gebied (heide en naaldbos), en 2 bokken, 2 geiten en 2 reekalveren in het noordoostelijk deel tussen de Kastelsedijk en de Gravenstraat (toponiem 'Oostelijke eindpaal'). In totaal is dit dus een bestand van 21 stuks wat zeer goed te noemen is voor een gebied van circa 160 hectare.

##### 4.10.3.5.2 Herpetofauna (amfibieën en reptielen)

Amfibieën zijn zeldzaam in de omgeving van de site te Dessel. De gerichte inventarisatie naar amfibieën<sup>73</sup> leverde slechts een beperkt aantal waarnemingen op, zoals bijvoorbeeld alpenwatersalamander (*Triturus alpestris*), bruine kikker (*Rana temporaria*) en groene kikker-complex (*Pelophylax esculenta synklepton*).

Wat reptielen betreft, werd enkel de levendbarende hagedis (*Zootoca vivipara*) verschillende keren opgemerkt. Deze diersoort verkiest vochtige heide- en veenterreinen met dopheide en pijpenstrootje en opslag van berk en grove den als biotoop. Ook allerlei droge biotopen, zoals droge heide, duinen, heischrale graslanden en open plekken in bossen, worden door deze soort bewoond.

##### 4.10.3.5.3 Ongewervelden

Zoals eerder vermeld, werden ook de populaties van dagvlinders, libellen, sprinkhanen, lieveheersbeestjes, loopkevers, spinnen, mieren, macrofauna en andere ongewervelde dieren bestudeerd. Bepaalde bedreigde of kwetsbare soorten werden waargenomen.

##### Dagvlinders

De veldwaarnemingen werden gebiedsdekkend uitgevoerd, in totaal werden 16 dagvlindersoorten waargenomen. Daarvan zijn er 2 opgenomen in de Vlaamse Rode lijst [R4-208], meer bepaald als 'kwetsbaar': heivlinder en bont dikkopje.

---

<sup>72</sup> Kitsen

<sup>73</sup> Uitgezette fuiken in de Hooibeek en overig veldwerk

### Libellen

In het studiegebied is weinig open water aanwezig. Desondanks werden niet minder dan 18 soorten libellen waargenomen, waarvan vier soorten zijn opgenomen in de Rode lijst [R4-209]. Het betreft bosbeekjuffer, beekrombout en bruine korenbout (bedreigd), en beekoeverlibel (kwetsbaar). Op basis van de vondsten van larven, is het duidelijk dat de bruine korenbout en de beekrombout zich voortplanten in de Hooibeek. Gezien de druine korenbout niet bekend was in de regio, hoewel deze regio bijzonder goed onderzocht is op libellen in het verleden, en zeer zeldzaam is in België, is vooral dit een belangrijke ontdekking. Deze en andere waarnemingen tonen aan dat de Hooibeek een zeer belangrijke waterloop is voor libellen

### Sprinkhanen

Tijdens een gerichte inventarisatie door middel van sleepvangsten en gehoorwaarnemingen op basis van hun zang, werden 14 sprinkhaansoorten waargenomen. Van de 14 soorten is meer dan een derde opgenomen in de Rode lijst [R4-210]: snortikker en moerassprinkhaan zijn kwetsbaar, heidesabelsprinkhaan, zwart wekkertje en veldkrekel zijn zeldzaam.

Heidesabelsprinkhaan en zwart wekkertje kennen hun hoogste dichtheden in natte heide en lijken zich optimaal thuis te voelen in de pijpenstroheide van het studiegebied, zo blijkt uit de hoge aantallen. Snortikker en veldkrekel zijn dan weer kensoorten van droge, voedselarme, schraal begroeide graslanden, vaak binnen de context van het heide-ecosysteem. Deze komen dan ook wat plaatselijker voor in het studiegebied, maar er zijn desalniettemin belangrijke populaties aanwezig. De frequent gemaaide, schrale bermen van de Europalaan zijn duidelijk de hotspot voor de veldkrekel.

### Lieveheersbeestjes

Er zijn 5 soorten lieveheersbeesten waargenomen in het studiegebied: de algemeen voorkomende 7-stippelige lieveheersbeestjes (*Coccinella septumpunctata*), Aziatisch lieveheersbeestje (*Harmonia axyridis*), roomvlek-lieveheersbeestje (*Calvia quatuordecimguttata*) en viervlek-lieveheersbeestje (*Exochomus quadripustulatus*), en het zeldzame schitterend lieveheersbeestje (*Coccinella magnifica*) [R4-211]. Deze laatste is gebonden aan nesten van rode bosmieren en voedt zich met bladluizen in door de mieren bewaakte kolonies. Het lieveheersbeestje komt, –net als de rode bosmier-, dus enkel in heidegebieden en bosranden voor, waar ze vaak op eiken en dennen zitten.

### Loopkevers

In totaal werden 2 458 loopkevers gevangen met bodemvallen, die verdeeld kunnen worden over 62 soorten. Hiervan is vrijwel één derde – namelijk 20 soorten - opgenomen in de nieuwe Rode lijst [R4-212]. Een overzicht van alle waargenomen Rode-lijstsoorten, verdeeld over de categorieën, geeft volgend beeld:

- kwetsbaar (3 soorten): smaragdkruiper (*Harpalus smaragdinus*), blauwe baardloper (*Leistus spinibarbis*) en heidekielspriet (*Poecilus lepidus*);
- zeldzaam (15 soorten): borsterglimmer (*Amara equestris*), dwergglimmer (*Amara tibialis*), heiderondbuik (*Bradycellus ruficollis*), mostandklauw (*Calathus cinctus*), noordelijke tandklauw (*Calathus micropterus*), goudglanzende schallebijter (*Carabus auronitens*), gariabele kruiper (*Harpalus anxius*), sobere kustkruiper (*H. attenuatus*), groene kruiper (*H. distinguendus*), kleine roodpoothalmkruiper (*H. griseus*), roostasterkruiper (*H. rufipalpis*), duinloper (*Masoreus wetterhallii*), heidespiegelloopkever (*Notiophilus*



*germyi*), brandzwaardschild (*Pterostichus quadrifoveolatus*) en moerashaarogkever (*Trichocellus placidus*);

- achteruitgaand (2 soorten): bronzen zandloopkever (*Cicindela hybrida*) en groene zandloopkever (*Cicindela campestris*).

Niet minder dan 19 van de 20 waargenomen Rode-lijstsoorten zijn kenmerkend voor (bepaalde ecotopen binnen) het heide-ecosysteem. Al de 19 heide-Rode-lijstsoorten zijn waardevolle indicatorsoorten, maar qua zeldzaamheid en mate van bedreiging zijn het wel merendeels ‘sub-toppers’. Een flink aantal zeldzame en sterk bedreigde heidesoorten zijn niet gevonden in het studiegebied.

### Spinnen

Bij het bodemvalonderzoek en aanvullende sleepvangsten, en veldwaarnemingen zijn in de periode midden maart – eind oktober 2008 niet minder dan 161 spinnensoorten gevangen in het studiegebied. Hiervan zijn 50 soorten op de Rode lijst Vlaanderen opgenomen. De meest bijzondere zijn de 3 met uitsterven bedreigde soorten, zonnekampoot (*Drassyllus praeficus*), prachtmierspin (*Micaria dives*) en de heidepiraat (*Pirata uliginosa*). Maar ook tal van de 16 bedreigde soorten zijn erg zeldzaam in Vlaanderen en riskeren op termijn in de categorie ‘met uitsterven bedreigd’ terecht te komen. De meeste Rode-lijstsoorten zijn kenmerkende soorten van het heide-ecosysteem, meer bepaald voor de ecotopen droge heide (5 soorten) en droge, voedselarme graslanden (27 soorten). Toch zijn er ook twee kensoorten van natte heide gevonden, een indicatie dat deze ecotoop daar recent nog aanwezig was en dat deze soorten wellicht in de meest vochtige pijpenstrovegetaties nog weten te overleven. Van de tien zeldzame bossoorten zijn er vier kenmerkend voor bosranden, drie voor bossen met dood hout en drie voor moerasbossen. Ook de kensoorten van moerasbossen wijzen erop dat dit ecotoop aanwezig was. Momenteel komen er plaatselijk nog veenmossen voor in het zuidelijk deel van het Corsicaanse-dennenbos en in het loofbos nabij de Geelsebaan (N118).

De rijke spinnenfauna in het studiegebied kan voor een belangrijk deel verklaard worden door de rijke vegetatiestructuur. Zo vinden we binnen de groep van de heidesoorten veel soorten met binding aan open plekken, andere aan graspollen, nog andere aan kortgrazige situaties. Deze rijke vegetatiestructuur ontstaat doordat er naast de niet-beheerde pijpenstrovegetaties, ook maaibeheer en begrazing (door (wilde) konijnen) plaatsvindt. Daarnaast is de landduin (ten noorden van de parking van Belgonucleaire) uit zichzelf zo voedselarm dat er enkel korstmosvegetaties groeien en deze worden door een grote variatie aan zeldzame tot zeer zeldzame spinnensoorten bewoond. Er zijn daar in totaal op drie onderzochte locaties 111 spinnensoorten aangetroffen, waarvan 40 Rode-lijstsoorten. Op basis van deze observaties kunnen we stellen dat het studiegebied een hoge ecologische waarde heeft.

### Mieren

Met 21 mierensoorten kan het studiegebied in Dessel tot de betere gebieden in Vlaanderen gerekend worden qua soortendiversiteit. Opmerkelijk is dat niet minder dan zeven van de gevangen soorten zijn opgenomen in de Rode lijst [R4-213], meer bepaald in de categorieën sterk bedreigd (mosslankmier (*Leptothorax muscorum*), zwarte staafmier (*Ponera coarctata*) en sabelmier (*Strongylognathus testaceus*)) en kwetsbaar (zwartrugbosmier (*Formica pratensis*), rode baardmier (*F. rufibarbis*), bloedrode roofmier (*F. sanguinea*) en kokersteekmier (*Myrmica schencki*)). De drie sterk bedreigde miersoorten, mosslankmier, zwarte staafmier en sabelmier zijn erg zeldzaam in Vlaanderen. Voor de sabelmier is dit zelfs de eerste waarneming ooit voor de provincie Antwerpen, ondanks de aanwezigheid van zeer waardevolle en goed onderzochte heidegebieden in het westen van de

provincie. Het zijn kensoorten van respectievelijk droge schraallanden, en natte en droge heide. Qua soortendiversiteit en qua soortenaantal dat op de Rode-lijst is opgenomen, wordt vastgesteld dat de structuurrijke pijpenstroheide ten noorden van de Europalaan ver boven de andere locaties uitsteekt met 16 soorten waarvan vijf Rode lijst-soorten.

### Avifauna

Het in kaart brengen van de broedvogels werd uitgevoerd tussen april en juli 2008 [R4-204]. Hiervoor werd het studiegebied opgedeeld in zes delen (Figuur 4 - 162).



**Figuur 4 - 162: Locatie van de observatiezones voor de inventarisatie van vogels: (1) bos- en begrast heidegebied; (2) "Zandbergen" (beboste heide met duin); (3) "Oostelijke Eindpaal" (enkel monotoon weiland); (4) "Steenheide" (voornamelijk agrarisch gebruik); (5) Naaldbos. De beschouwde zesde zone is de "randzone" met weiland ten zuiden van de Hooibeek (zone waar de schaal op de figuur staat).**

Tijdens het ecologische onderzoek werden 55 waarschijnlijk of zeker broedende vogels waargenomen. De meest voorkomende soorten zijn de Europese roodborst (*Erithacus rubecula*), vink (*Fringilla coelebs*), winterkoning (*Troglodytes troglodytes*) en houtduif (*Columba palumbus*). De meest opmerkelijke observatie is de aanwezigheid van 25 boompiepers (*Anthus trivialis*), een bedreigde diersoort, waarvan 17 in zone 1. De boompiepers komen voor in bosranden en beboste heidegebieden. Deze laatste is biologisch het meest waardevolle gebied voor avifauna. De opmerkelijke aantallen van deze vogelsoort tonen aan dat het ecotoop boomheide (en de overgang van bos naar heide) in aanzienlijke oppervlakte aanwezig is en mooi ontwikkeld is.

Sommige niet-broedende vogels (bijvoorbeeld de reiger) worden soms waargenomen tijdens hun zoektocht naar voedsel of rust. De ijsvogel (*Alcedo atthis*) is geregeld waargenomen langs de visrijke Hooibeek en ook aan de vijver op de site van Belgoprocess / Belgonucleaire. De zwarte specht (*Dryocopus martius*) gebruikt het studiegebied minstens als jachtgebied, en mogelijk ook als broedgebied. Het naaldbos in het studiegebied vormt echter geen belangrijk broedgebied voor deze vogelsoort; in de bosrijke omgeving daarentegen zijn wel goede broedgelegenheden aanwezig. De zeldzame wespendif (*Pernis apivorus*) is frequent waargenomen, broedt wellicht in de directe omgeving en gebruikt het studiegebied vermoedelijk als jachtgebied. Ook de gekraagde

roodstaart (*Phoenicurus phoenicurus*) is een typische ‘bosrandsoort’. De soort kende een sterke achteruitgang in Vlaanderen, en komt vooral voor in de Kempen (circa 70% van de populatie) en zandig Vlaanderen (circa 20%). Open, lichtrijke naald- en loofbossen worden verkozen, evenals de overgangen van deze bossen naar open terrein (heide, schraal grasland). De matkop (*Poecile montanus*) verkiest (jonge, vochtige) wilgen-, berken- en elzenbossen met een groot aandeel dood hout, waarin ze – in tegenstelling tot andere mezen- zelf een nestholte uithakken. Ook in oudere dennenbossen komen ze graag voor. Het is een vrij talrijke broedvogel in Vlaanderen, die echter een aanzienlijke achteruitgang heeft doorgemaakt in de voorbije decennia [R4-214].

Naast de Rode-lijstsoorten en internationaal beschermde soorten zijn volgende minder algemene soorten in het studiegebied zeker vermeldenswaard: buizerd (*Buteo buteo*), torenvalk (*Falco tinnunculus*), bosuil (*Strix aluco*) en grauwe vliegenvanger (*Muscicapa striata*). Een aantal soorten is geassocieerd met de aanwezige of nabije woonomgeving, met name Turkse tortel (*Streptopelia decaocto*), ekster (*Pica pica*), huismus (*Passer domesticus*) en groenling (*Carduelis chloris*). Opvallend is dat de vink (*Fringilla coelebs*) vrij talrijk in iedere deelzone voorkomt. Vanuit de faunagroep broedvogels kunnen we besluiten dat het heidegebied momenteel een zeer hoge waarde heeft. Het naaldbos en de raaigrasakkers hebben een matige avifaunistische waarde.

Het is duidelijk dat het Donkmeer een belangrijke plas is voor de overwintering van eenden (brilduiker (*Bucephala clangula*), smient (*Anas penelope*), bergeend (*Tadorna tadorna*), kraakeend (*Anas strepera*), tafeleend (*Aythya ferina*), wintertaling (*Anas crecca*)), ganzen (brandgans (*Branta leucopsis*), grauwe gans (*Anser anser*)), meeuwen (stormmeeuw (*Larus canus*), kokmeeuw (*Chroicocephalus ridibundus*), wilde en kleine zwanen (*Cygnus cygnus* en *Cygnus columbianus bewickii*). De plas is eveneens het jachtgebied voor de slechtvalk (*Falco peregrinus*), die broedt op de aanpalende industriële gebouwen. Verschillende van de hierboven vermelde wintergasten/doortrekkers zijn Europees beschermd (Vogelrichtlijn), met name wilde en kleine zwaan (*Cygnus cygnus* en *Cygnus columbianus bewickii*) evenals slechtvalk (*Falco peregrinus*).

#### 4.10.3.6 Vijvers en rivieren

In de omgeving van een waterplas kan een grote variëteit aan vogels worden gevonden. Verschillende soorten watervogels leven in deze omgeving. Alleen op wilde eenden wordt soms gejaagd om ze te gebruiken voor menselijke consumptie [R4-204].

In de hoge zuurstofhoudende beken in het laagland worden vissen zoals rivierdonderpad (*Cottus gobio*), bierpje (*Noemacheilus barbatulus*), beekprik (*Lampetra planeri*), kleine modderkruiper (*Cobitis taenia*) en grote modderkruiper (*Misgurnus fossilis*) gevonden [R4-204].

In grotere rivieren neemt de variëteit in soorten toe. In het stroomgebied van de Nete konden 32 vissoorten herkend worden in 2001. De meest voorkomende soorten zijn baars (*Perca fluviatilis*), blankvoorn (*Rutilus rutilus*), driedoornig stekelbaarsje (*Gasterosteus aculeatus*), paling (*Anguilla anguilla*), riviergrondel (*Gobio gobio*), negendoornige stekelbaars (*Pungitius pungitius*), alver (*Alburnus alburnus*), bierpje (*Barbatula barbatulus*), bruine dwergmeerval (*Ameiurus nebulosus*), kolblei (*Blicca bjoerkna*), kopvoorn (*Leuciscus cephalus*), pos (*Gymnocephalus cernuus*), ruisvoorn (*Scardinius erythrophthalmus*), snoek (*Esox lucius*) en zonnebaars (*Lepomis gibbosus*) [R4-204], [R4-215], [R4-216], [R4-217]. Sommige van deze vissoorten worden gevangen voor menselijke consumptie.

Ook in het kader van de ecologische studie werd de visfauna bestudeerd (vangstmethode). Veertien soorten werden gevangen in de Hooibek en de uitlaatgracht van het kanaal Bocholt-Herentals tussen Sas VI en de Geelsebaan. De aanwezigheid van kopvoorn (*Leuciscus Leuciscus*) is opmerkelijk omdat deze soort zeldzaam is.

#### 4.10.3.7 Beheerde systemen

Het rivierengebied tussen de Grote Nete en de Kleine Nete wordt gekenmerkt door eerder of recent gecultiveerd land met de nadruk op landbouw. Sommige gebieden zijn minder intensief bewerkt en worden gekenmerkt door overblijfselen van heide (als gevolg van ontbossing in de afgelopen 50 jaar) en houtwallen.

Afgezien van de landbouw (47% van het gebied) wordt een derde van het rivierengebied tussen Grote Nete en de Kleine Nete sterk beïnvloed door de mens: woonwijken, industriegebieden en zandputten. Sommige van de zandputten zijn geëvolueerd naar biologisch belangrijke gebieden (bijvoorbeeld De Maat, Rauw, ...). Zeer waardevol en zeer zeldzaam zijn de vegetatietypes langs de kanalen in Mol (alkalische eutrofe vennen, zoals het Buitengoor).

#### 4.10.3.8 Weilanden en agrarische ecosystemen

Gedetailleerde informatie over landgebruik in België is verkrijgbaar bij het Mest Actie Plan (MAP). Een geselecteerd gebied van de basiskaart wordt weergegeven in Figuur 4 - 22. Er bevinden zich verschillende akkers dicht in de buurt van de bergingssite. Landbouwbedrijven zijn verspreid over de hele regio. In de onmiddellijke nabijheid van de voorgestelde bergingssite concentreert de meerderheid van de landbouwactiviteiten zich op de veeteelt (melkproductie). De productie van vlees en granen is beperkt en is bestemd voor lokaal gebruik.

Weilanden komen voor op plaatsen waar jaarlijks gemaaid en begraasd wordt. De aangroei van bomen wordt voorkomen en de vegetatie bestaat voornamelijk uit gras- en kruidsoorten. De variëteit aan soorten hangt af van de vochtigheid, de voedingsbodem en het landbeheer.

In de regio van Mol en Dessel wordt intensief aan landbouw gedaan. Melkvee en af en toe schapen worden gehouden op de weilanden. In de regio worden ook rundvee en varkens op stal gehouden (zie §0).

De weilanden worden afgewisseld met de teelt van maïs, één van de meest voorkomende landbouwgewassen. Deze maïs wordt gebruikt als veevoeder tijdens de winterperiode (veestapel). Er zijn bijna geen kruidachtige soorten aanwezig (bijvoorbeeld enkel monocultuur van grassen). Er wordt ook veel bemest [R4-205], [R4-206].

De voornaamste klassen van landgebruik voor de streek zijn maïs, aardappelen, gras, loofbomen, en niet-geïrrigeerde landbouwgrond. Merk op dat voor de percelen met maïs, aardappelen, tarwe en suikerbieten, vruchtwisseling wordt toegepast. Een typisch roulatieschema is aardappelen / suikerbieten / wintertarwe / maïs.

#### 4.10.3.9 Zoetwater visvijvers

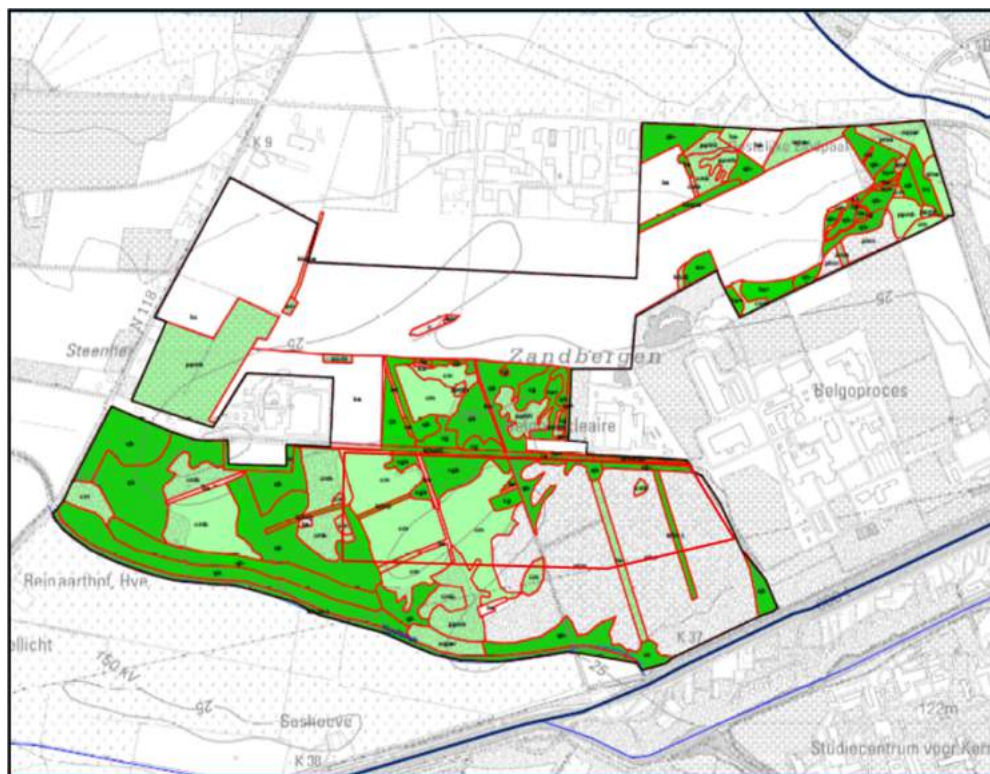
In de omgeving van Mol en Dessel zijn vele kleine visvijvers aanwezig langs de Nete rivieren. De meest voorkomende soorten vissen in dit type ecosysteem zijn brasem (*Abramis brama*), karper (*Cyprinus carpio*) en af en toe snoek (*Esox Lucius*) [R4-205].

#### 4.10.4 Gebieden met een hoge biologische en ecologische waarde

De biologische waarde van de site Mol-Dessel wordt weergegeven in Figuur 4 - 163. De regio is verdeeld in biologisch minder waardevol, biologisch waardevol en biologisch zeer waardevolle gebieden.

De gebieden met een hoge biologische waarde komen grotendeels overeen met de gebieden met loofbos. De heide in de regio wordt beschouwd als "slechts" biologisch waardevol omdat het op de meeste plaatsen wordt

gedomineerd door het pijpenstrootje (*Molinia caerulea*). De gebieden van minder biologische waarde zijn de naaldbossen en de beheerde systemen.



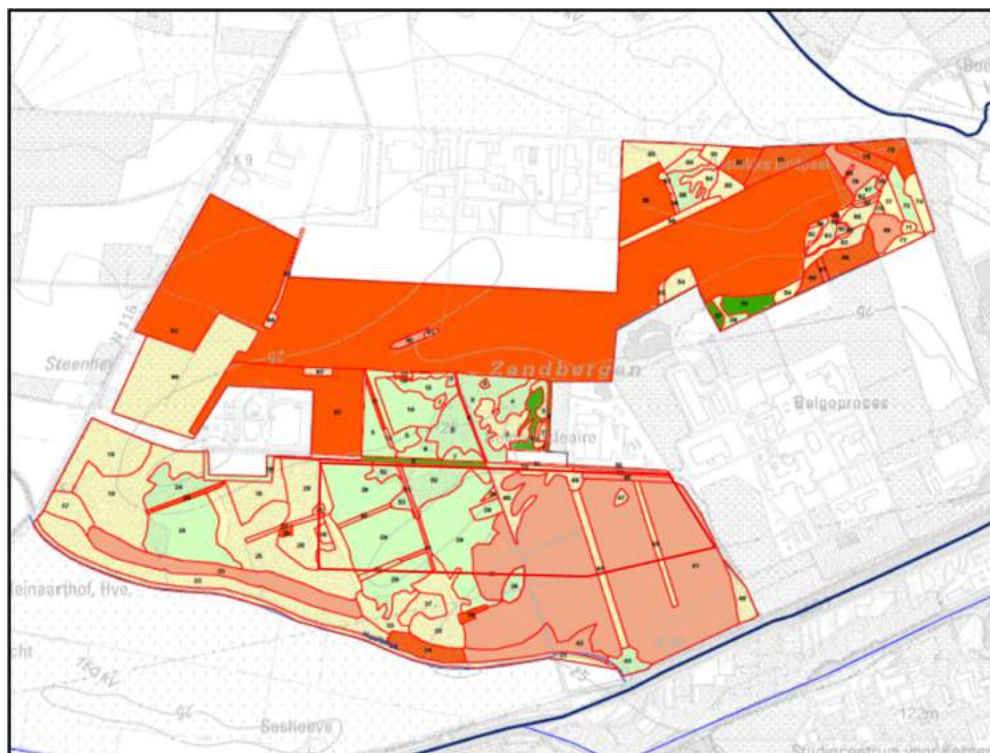
**Figuur 4 - 163: Biologische waarderingskaart van de omgeving rond de site. Lichtgroene gebieden zijn biologisch waardevol; donkergroene gebieden zijn zeer waardevol (uit [R4-193]).**

De ecologische waarde van een grondgebied wordt gedefinieerd als een maat voor de waarde van het gebied als habitat voor het in stand houden van soorten flora en fauna. Gebaseerd op de biologische waarderingskaart (Figuur 4 - 163) hanteert het ecologische studieonderzoek de volgende criteria om de ecologische waarde van de regio Mol-Dessel te evalueren [R4-204]:

- de aanwezigheid en het dekkingspercentage van de verwachte plantensoorten;
- de aanwezigheid van zeldzame planten-/diersoorten;
- de aanwezigheid van exotische planten/dieren<sup>74</sup>;
- de vervangbaarheid van vegetaties (samenstelling en structuur);
- de globale verscheidenheid aan soorten (flora en fauna);
- de toegevoegde waarde van de vegetatie aan de fauna.

<sup>74</sup> Dit wordt beschouwd als biologische verontreinigingen en heeft daardoor een negatieve ecologische factor.

Het resultaat is weergegeven in Figuur 4 - 164. Vijf ecologische waardeklassen worden beschouwd: geen tot zeer lage ecologische waarde, lage ecologische waarde, matige ecologische waarde, een hoge ecologische waarde en zeer hoge ecologische waarde.



**Figuur 4 - 164: Ecologische waarderingskaart van de omgeving rond de site [R4-204]. Rood gearceerde gebieden hebben geen of een zeer lage ecologische waarde; oranje gearceerde gebieden hebben een lage ecologische waarde. Geel ingekleurde gebieden hebben een matige ecologische waarde. Licht- en donkergroene zones hebben respectievelijk een hoge en een zeer hoge ecologische waarde.**

Meerdere kleine gebieden met een zeer hoge ecologische waarde werden geïdentificeerd. Deze gebieden zijn gelegen aan de rand van de site van Belgoproces en langs de weg (Europalaan) tussen de bergingssite en Belgonucleaire. De zones met een hoge biologische waarde beslaan een belangrijk gebied (heide<sup>75</sup>).

De oostelijke tumulus bevindt zich in een gebied van lage ecologische waarde, de westelijke tumulus is gesitueerd in een gebied met hoge ecologische waarde. In het kader van het beeldkwaliteitsplan is wel voorzien om minder waardevolle gebieden om te zetten naar meer waardevol heidegebied.

<sup>75</sup> Heide is in het algemeen een zeer rijk ecosysteem voor de fauna, maar de botanische diversiteit is in het algemeen laag. Dit is echter niet zo voor de bestudeerde gebieden, waar soortenrijke vegetaties aanwezig zijn die in de meeste andere heidegebieden in Vlaanderen ontbreken.

## 4.11 Transportprocessen in geosfeer en biosfeer

### 4.11.1 Transportprocessen in de geosfeer

Het transport van contaminanten in watervoerende lagen kan in hoofdzaak door de volgende drie<sup>76</sup> processen beschreven worden, waarvan de eerste twee processen het netto deeltjestransport beschrijven, en het laatste proces de concentratie in de waterfase bepaalt:

- advectie
- dispersie en diffusie
- sorptie

Het advectief-dispersief transport resulteert in dilutie (vermindering van concentratie) van contaminanten in watervoerende lagen. In geval van radionucliden dient men ook rekening te houden met radioactief verval. Deze processen worden hieronder kort toegelicht.

#### 4.11.1.1 Advectie

Advectie betreft het transport van contaminanten aan dezelfde snelheid als die van het grondwater. De snelheid van het grondwater is lineair gerelateerd aan het specifieke debiet (Darcy flux) door de effectieve porositeit. Gewoonlijk wordt de Darcy flux voor een transportberekening bekomen uit een drie-dimensionaal grondwaterstromingsmodel.

#### 4.11.1.2 Dispersie en diffusie

Dispersie in een poreuze omgeving refereert naar een proces dat resulteert in de spreiding of uitsmering van contaminanten over een uitgebreidere regio dan door gemiddelde grondwatersnelheidsvectoren zou worden voorspeld. Dispersie wordt enerzijds veroorzaakt door ‘mechanische dispersie’, het resultaat van afwijkingen van de feitelijke snelheid op microschaal van de gemiddelde grondwatersnelheid, en anderzijds door ‘moleculaire diffusie’, dat veroorzaakt wordt door concentratiegradiënten. In watervoerende lagen is moleculaire diffusie in het algemeen verwaarloosbaar vergeleken met het effect van mechanische dispersie. Enkel wanneer de grondwatersnelheden zeer klein worden, neemt het aandeel van moleculaire diffusie toe. De som van mechanische dispersie en moleculaire diffusie wordt ‘hydrodynamische dispersie’ genoemd of kortweg ‘dispersie’. Er zijn evenwel geen site-specifieke gegevens beschikbaar (Annex 2 §31 van [OD-037] en §3.1 in [OD-026]).

#### 4.11.1.3 Sorptie

Het sorptieproces vertegenwoordigt een oppervlakte-interactie tussen de vloeibare en de vaste fase waarbij een bepaalde substantie zich bindt aan een ander. Sorptie, indien reversibel, veroorzaakt retardatie, een vertraging van het transport van de opgeloste stof doorheen de watervoerende laag.

---

<sup>76</sup> Precipitatie/dissolutieprocessen worden buiten beschouwing gelaten, aangezien deze enkel kunnen optreden bij geochemische onevenwichten (bv. menging van grondwaters met verschillende samenstelling) en voor de site in Dessel geen rol spelen.

#### 4.11.1.4 Radioactief verval

Radioactief verval vermindert de massa aan radionucliden in aquifers door desintegratie van de atomen. Bij langlevende isotopen zal dit effect echter weinig tot geen bijdrage leveren.

#### 4.11.1.5 Dilutie

Om de totale impact van een bergingsinrichting op de omgeving te kunnen voorspellen, dient de concentratie van de contaminanten in de omgeving voldoende gekwantificeerd te zijn. De mogelijke omvang van een contaminatie wordt geëvalueerd door de studie van de migratie van radionucliden vanuit de bergingsinrichting doorheen het hydrogeologisch systeem tot aan de receptor in de biosfeer. Een gedetailleerd en accuraat transportmodel is dan nodig om inschattingen te kunnen maken betreffende de radionuclideconcentraties in de watervoerende lagen, de massafluxen naar lokale oppervlaktewaters en de concentraties in een hypothetische waterput. Uiteindelijk moeten de transportberekeningen leiden tot een reeks van geotransferfactoren (GTF) die het gecombineerd effect vertegenwoordigen van de processen in het hydrogeologisch systeem, zoals advectie, diffusie en dispersie (of hydrodynamische dispersie) en de uitmiddeling van concentraties omwille van verstoringen van het systeem, zoals bijvoorbeeld een hypothetische waterput, en dit bij verschillende hypothesen voor wat betreft mogelijke klimaatwijzigingen of wijzigingen in aanwezigheid van oppervlaktewaters.

#### 4.11.2 Transportprocessen in de biosfeer

De belangrijkste interfases tussen de geosfeer en de biosfeer in de regio Mol-Dessel zijn een waterput, oppervlaktewaters en kwelgebieden.

Vanuit deze interfases kunnen contaminanten zich verder verspreiden in de biosfeer door natuurlijke transportprocessen (uitgezonderd de waterput), of door tussenkomst van de mens. Transportprocessen in de biosfeer als gevolg van menselijke praktijken en gewoontes (bijvoorbeeld irrigatie van gewassen en weiden), kunnen resulteren in verschillende blootstellingswegen aan radioactieve straling (via ingestie van besmet water, gewassen, vlees, vis, enzovoort, en inhalatie van gasvormige nucliden en externe bestraling). Deze biosfeerprocessen worden geconceptualiseerd in het biosfeermodel van de veiligheidsevaluatie volgens de 'reference biosphere approach'. De bijhorende hypothesen worden beschreven in §14.4.7.1 van [HS14].

Natuurlijke transportprocessen in de biosfeer omvatten in het algemeen:

- advectief-dispersief transport in grond- en oppervlaktewaters
- mechanische verweringsprocessen (erosie door wind en water)
- biologisch gemedieerde transportprocessen
- atmosferische processen

Opgeloste deeltjes in het grondwater kunnen zich advectief-dispersief verder verspreiden. In bodems kunnen bepaalde contaminanten sorberen op de vaste fase. In het geval van kwelgebieden kunnen contaminanten uit het grondwater rechtstreeks opgenomen worden door planten via het wortelstelsel. Binnen de plant is er translocatie van contaminanten naar de verschillende plantendelen. Door biologische afbraakprocessen (inclusief vraat door dieren) of door regenafspoeling kunnen contaminanten vanuit planten terug in de bodem terecht komen. Contaminanten op of in de bodem kunnen door de infiltratie terug naar het grondwater gebracht worden of



kunnen door surface run-off en watererosie<sup>77</sup> verder verspreiden naar andere bodems, kwelgebieden en waterlopen.

Opgeloste deeltjes kunnen zich binnen een waterloop verder verspreiden door de waterstroming en via vissen aanwezig in de waterloop, en verder ook worden geabsorbeerd op de sedimenten. Bij rivieren bewegen sedimenten deels mee met het rivierwater, waardoor contaminanten zich verder kunnen verspreiden. Er vindt ook sedimentatie plaats, waardoor contaminanten op de bodem van waterlopen terechtkomen. Op en nabij rivieroeveren kunnen contaminanten uit sedimenten zich verder verspreiden door resuspensie en emanatie.

Er kan emanatie van gasvormige contaminanten plaatsvinden vanuit de bodem (radon, CO<sub>2</sub>). Van op of in gewassen kan er evaporatie en transpiratie plaatsvinden, waardoor contaminanten onder gasvorm in de atmosfeer vrijkomen. Door winderosie (resuspensie) kunnen contaminanten uit de bodem via aërosolen/stofdeeltjes in de atmosfeer geraken. In de atmosfeer kan atmosferische dispersie optreden door convectie en diffusie (zie §4.4.2).

---

<sup>77</sup> Omwille van de vlakke topografie zijn erosiesnelheden laag in de regio Mol-Dessel.

## **4.12 Referentietoestand van de site en haar omgeving**

### **4.12.1 Niet-radiologische referentietoestand**

Informatie over de niet-radiologische referentiemetingen is terug te vinden in [OD-051], en meer bepaald in §7.4.2 (chemische karakterisatie van het grondwater, rivier -en regenwater) en in §7.1.3 (chemische karakterisatie van het sediment). Metingen betreffende stabiele isotopen en opgeloste gassen zijn beschreven in §7.4.3. Een samenvatting van deze studies is opgenomen in dit hoofdstuk: voor de vaste fase (§4.8.1.3), voor de vloeibare fase (§4.8.2.1) en de aanwezigheid van isotopen in de hydrologische cyclus (§4.8.2.2). Chemische kenmerken van de ondiepe bodem zijn beschreven in [OD-245]. Parameters die zullen worden opgevolgd in het kader van het monitoringsprogramma, zijn beschreven in §16.4.7 van [HS16].

### **4.12.2 Radiologische referentietoestand**

Een overzicht van de reeds uitgevoerde radiologische referentiemetingen kan worden teruggevonden in §16.4.7 van [HS16].

## 4.13 Referenties

### 4.13.1 Lijst van ondersteunende documenten (OD's)

- [OD-026] ONDRAF/NIRAS, Hydrogeological modelling of the Dessel site: Overview report. NIROND-TR 2008-15E V3 (M. Gedeon, B. Rogiers, D. Mallants, K. Vandersteen & E. Laloy), 2018.
- [OD-037] ONDRAF/NIRAS, Data collection forms for long-term safety assessment. Project near surface disposal of category A waste at Dessel. NIROND-TR 2008-22E V2 (B. Leterme, D. Mallants, S. Labat, G. Olyslaegers, S. Seetharam, J. Perko, L. Sweeck, L. Wang, M. Gedeon, D. Jacques, B. Rogiers & H. Vandenhove), 2019.
- [OD-040] ONDRAF/NIRAS, Modelling potential and actual evapotranspiration and drainage at the nuclear zone Mol-Dessel. NIROND-TR 2008-25E V2 (D. Jacques, B. Leterme & D. Mallants), 2011.
- [OD-043] ONDRAF/NIRAS, Element independent biosphere parameters. NIROND-TR 2008-28E V3 (L. Sweeck), 2018.
- [OD-046] ONDRAF/NIRAS, Seismic-loading analysis. NIROND-TR 2009-03E V3 (K. Vanneste, K. Verbeeck, Th. Camelbeeck, B. Vleminckx & Th. Richir), 2017
- [OD-051] ONDRAF/NIRAS, Geological, hydrogeological and hydrological data for the Dessel disposal site. NIROND-TR 2009-05E V2 (K. Beerten, M. Gedeon, B. Rogiers & B. Leterme), 2018.
- [OD-065] ONDRAF/NIRAS, Long-term evolution of the multi-layer cover. NIROND-TR 2010-03E V2 (D. Jacques, B. Leterme, K. Beerten, S. Schneider, P. Finke & D. Mallants), 2018.
- [OD-077] ONDRAF/NIRAS, Long-term climate change and effects on disposal facility, geosphere, and biosphere, NIROND-TR 2009-07E V2 (B. Leterme & D. Jacques), 2018.
- [OD-084] ONDRAF/NIRAS, Inschatting van het overstromingsrisico ter hoogte van de noordelijke nucleaire site te Dessel-Mol. IMDC I/RA/14146/10.033/JSW, NIROND-TR 2011-26N V1 (J. Swings & W. Bastiaens), 2011.
- [OD-086] ONDRAF/NIRAS, Geotechnical report of the disposal site at Dessel. NIROND-TR 2011-41E, (K. Remeysen & A. van Cothem), 2011.
- [OD-117] ONDRAF/NIRAS, Environmental non-human biota impact assessment and associated risk linked with biosphere releases from category A waste disposal. NIROND-TR 2010-09E V2 (H. Vandenhove, L. Sweeck, J. Vives i Batlle & J. Wannijn), 2018.
- [OD-120] ONDRAF/NIRAS, Settlements of the disposal structures during the construction and operational phases based on 3D modelling. NIROND-TR 2011-39E V4 (K. Remeysen & N. Lambert), 2018.
- [OD-188] ONDRAF/NIRAS, Loading test – Results and Analyses. NIROND-TR 2011-38E (N. Lambert & K. Remeysen), 2011.
- [OD-233] ONDRAF/NIRAS, Climatic design loads. NIROND-TR 2011-82E V3 (T. Richir), 2018.
- [OD-244] SCK•CEN, Studie van de radiologische toestand van de site Mol-Dessel. SCK-rapport R-3675 (F. Hardeman et al.), 2002.
- [OD-245] ONDRAF/NIRAS, Oriënterend bodemonderzoek in het kader van de aankoop van het terrein voor oppervlakteberging van Umicore, nota 2008-0574 (T. Soetens), 2008.

#### 4.13.2 Lijst van referenties

- [R4-1] G. De Moor & A. Pissart; Het Reliëf. In: Geografie van België (Ed. J. denis), Gemeentekrediet, Brussel. 1992.
- [R4-2] Vlaamse overheid, departement Leefmilieu, Natuur en Energie, afdeling Land en Bodembescherming, Ondergrond, Natuurlijke Rijkdommen; Erosiegevoeligheidskaart van de Vlaamse gemeenten. 2006.
- [R4-3] K. De Nil; Evaluation of the long-term performance assessment of Multi-layer covers for the surface disposal of low-level radioactive waste. Rapport de Stage, Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées: Ingénierie des Georessources et Risques, Institute EGID, Université Bordeaux III et SCK•CEN. 2003.
- [R4-4] G. Govers & J. Poesen; Fysische en sociaal-economische aspecten van het bodemerosieprobleem in België. In: H. Van der Haegen en E. Van Hecke (Eds.) Liber Amicorum M. Goossens, Leuven. Acta Geographica Lovaniensia vol:33 (p. 531-540). 1992.
- [R4-5] Geomorphological evolution of the Nete basin: identification of past events to assess the future evolution. External Report SCK•CEN-ER-137, 2010.
- [R4-6] Pers. Comm. Prof. G. Govers (KULeuven) in [OD-065], 2010.
- [R4-7] Panagos, P., Ballabio, C. Meusburger, K., Spinonia, J., Alewell, C., Borrellia, P.; Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. Journal of Hydrology 548, 2017.
- [R4-8] D. Hillel; Environmental soil physics. Academic Press, p. 771. 1998.
- [R4-9] K. Beerten, K. Deforce & D. Mallants; Age constraints for pedological and hydrological processes in natural analogues of earth covers for waste disposal: case study from a sediment-soil sequence in Dessel, Northern Belgium. Geophysical Research Abstracts 13, EGU2011-10418. 2011.
- [R4-10] F. Bogemans; Technisch verslag bij de opmaak van de Quartairgeologische kaart van Vlaanderen. Vlaamse Overheid, Dienst Natuurlijke Rijkdommen. 2005.
- [R4-11] AGIV (Agentschap Geografische Informatie Vlaanderen); Bodemassociates, versie 1992, schaal 1:500 000. Vlaamse Landmaatschappij. 1998.
- [R4-12] L. Baeyens, Verklarende tekst bij de bodemkaart van België: Retie 31W, Instituut tot Aanmoediging van het Wetenschappelijk Onderzoek in Nijverheid en Landbouw, 1974
- [R4-13] P. Seuntjens, D. Mallants, N. Toride, C. Cornelis & P. Geuzens, Grid lysimeter study of steady-state chloride transport in two Spodosol types using TDR and wick samplers, Journal of Contaminant Hydrology 51 (p. 13-39). 2001
- [R4-14] J. Vanderborght, M. Vanclooster, A. Timmerman, P. Seuntjens, D. Mallants, D.-J. Kim, D. Jacques, L. Hubrechts, C. Gonzales, J. Feyen, J. Diels & J. Deckers, Overview of inert tracer experiments in key Belgian soil types: Relation between transport and soil morphological and hydraulic properties, Water Resources Research 37: 2873-2888, 2001.
- [R4-15] J. Van Orshoven & D. Vandembroucke; Handleiding bij AARDEWERK Databestand van bodemprofielgegevens. Rapport 18A. IWONL, Brussel. 1993.
- [R4-16] Louwye, S., De Schepper, S., Laga, P., Vandenberghe, N., The Upper Miocene of the southern North Sea Basin (northern Belgium): a palaeoenvironmental and stratigraphical reconstruction using dinoflagellate cysts. Geological Magazine, 144(1), 33-52, 2007.

#### *Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

##### *Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-17] P.L. Gibbard; The history of the great north-west European rivers during the past three million years. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B318 (p. 559-602). 1988.
- [R4-18] IMA-Europe's dust monitoring programme, Company Report Company 11, Site 51, Campaign: Summer 2008.
- [R4-19] Belgian Federal Government Service (ministry) of Economy, Toerisme en hotelwezen, Directorate-general Statistics and Economic Information, Belgium – available from [http://statbel.fgov.be/figures/d73\\_nl.asp](http://statbel.fgov.be/figures/d73_nl.asp) (page accessed on 31 March 2009).
- [R4-20] Belgian Federal Government Service (ministry) of Economy, Sociale geografie – bodemgebruik, Directorate-general Statistics and Economic Information, Belgium – available from [http://statbel.fgov.be/figures/d130\\_nl.asp](http://statbel.fgov.be/figures/d130_nl.asp) (page accessed on 31 March 2009).
- [R4-21] n.v. De Scheepvaart, Jaarverslag 2007, 2008 – available from [http://www.descheepvaart.be/images/dbimages/docs/DS\\_jaarverslag2007.pdf](http://www.descheepvaart.be/images/dbimages/docs/DS_jaarverslag2007.pdf) (page accessed on 4 June 2009).
- [R4-22] Tractebel Engineering n.v., Oppervlaktebergings radioactief afval categorie A te Dessel - Aspecten rond vliegtuigval - Screening van het Belgisch luchtruim, 2008.
- [R4-23] L. Sweeck, Dosisimpact van de lozingen van radioactieve effluënten in de Molse Nete. SCK•CEN-R-5869, 2015.
- [R4-24] <https://www.gemeente-en-stadsmonitor.vlaanderen.be/sites/default/files/gemeenterapport/>
- [R4-25] K. Giannakouris, Ageing characterises the demographic perspectives of the European societies, eurostat 72/2008, European Commission, 2008.
- [R4-26] Belgian Federal Government Service (ministry) of Economy, Bevolking en huishoudens – Huishoudens en familiekeren, S220.A3N/2005, Directorate-general Statistics and Economic Information, Belgium, 2008.
- [R4-27] Provinciale en Intercommunale Drinkwatermaatschappij der Provincie Antwerpen, Water...Wat mensen drijft – Jaarverslag 2007, pidpa, 2008 – available from <http://www.pidpa.be/nl/bedrijfsinfo/pdf/jaarverslag20PIDPA202007.pdf> (page accessed on 31 March 2009).
- [R4-28] AMINAL, Databank vergunningen categorie A en B, 2000
- [R4-29] R. Berten, P. Hermans & D. Paelinckx, Biologische waarderingskaart – Verklarende tekst bij kaarten 3-9-17, Mededelingen van het Instituut voor Natuurbewoud 9, 125 pp. + 25 kaartbladen, Brussels, 2000.
- [R4-30] EC, Farm Structure Survey in Belgium - 2007 - Issue number 99/2009, [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product\\_details/publication?p\\_product\\_code=KS-SF-09-099](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/product_details/publication?p_product_code=KS-SF-09-099) (pages accesses at 01/02/2011).
- [R4-31] ARCADIS, 2011, Een geïntegreerd project van oppervlaktebergings in Dessel voor het Belgisch laag- en middelactief kortlevend afval. Plan-MER inrichtingsvoorstel noordelijke nucleaire zone. Projectnummer 22/000994, 462p. Oktober 2011.
- [R4-32] Land- en tuinbouwsector in de provincie Antwerpen in cijfers. Provincie Antwerpen, 2011.
- [R4-33] Visienota. Visie ruimtegebruik en ruimtebeslag 2020-2050. Steunpunt Ruimte en Wonen in samenwerking met Departement RWO, 2009.
- [R4-34] G.T. Trewartha, Fundamentals of Physical Geography, McGraw-Hill Co, 1968.
- [R4-35] Royal Meteorological Institute of Belgium (RMI), [www.meteo.be](http://www.meteo.be) (accessed on Feb. 8th, 2011 and Mar. 23<sup>rd</sup>, 2016).

*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-36] L. Wouters & N. Vandenberghe, Geologie van de Kempen – Een synthese, NIROND 94-11, 1994.
- [R4-37] Compass card of wind direction, ONDRAF/NIRAS note 2009-1100 rev.0, 27/05/2009.
- [R4-38] Koninklijk Meteorologisch Instituut van België (KMI) & Mol SCK•CEN.
- [R4-39] Bultynck, H., Malet, L., Sharma, L.N. Van Der Parren, J., Atmospheric dilution factors and calculations of doses in the environment of SCK•CEN Mol for short and long duration stack discharges. SCK•CEN report BLG 446, 1970.
- [R4-40] Brief van SCK op datum van 31/03/2018 met referentenummer BLe/2018-01.
- [R4-41] Pasquill, F., Atmospheric Diffusion: The dispersion of windborne material from Industrial and other Sources, 2nd edition, Ellis Horwood Ltd, Chichester. 1974.
- [R4-42] Brief van SCK op datum van 19/04/2018 met referentenummer BLe/2018-02.
- [R4-43] A. Forton, De gemiddelde minimumtemperaturen in de grond, Referentieperiode 1985-1991 = 7 jaren, KMI Klimatologie, 1993.
- [R4-44] L. Debontridder, Letter dated 19/01/2009 concerning Aanvraag voor klimatologische inlichtingen van 15/01/2009, ref. R090081, KMI, 19 January 2009.
- [R4-45] G. Demarée, Intensity-Duration-Frequency Relationship of Point Precipitation at Uccle, Reference Period 1934–1983, Institut Royal Météorologique de Belgique, Publications Série A 116, pp. 1–52, 1985.
- [R4-46] Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996 pp., 2007.
- [R4-47] Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535 pp., 2013.
- [R4-48] BIOCLIM, Modelling Sequential Biosphere Systems under Climate change for Radioactive Waste Disposal, Deliverable D10-12: Development and Application of a Methodology for Taking Climate-Driven Environmental Change into Account in Performance Assessments, 2004.
- [R4-49] BIOCLIM, Global climatic features over the next million years and recommendation for specific situations to be considered, Deliverable D3 of the BIOCLIM project on Modelling Sequential BIOSphere systems under CLIMate change for radioactive waste disposal, 2001.
- [R4-50] P. Baguis, V. Ntegeka, P. Willems & E. Roulin, *Extension of CCI-HYDR climate change scenarios for INBO*, Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) & Belgian Science Policy – SSD Research Programme, Technical Report by K.U. Leuven – Hydraulics Section & Royal Meteorological Institute of Belgium, 31 pp., January 2009.
- [R4-51] M. Dusar, V. Langenaeker & L. Wouters; Permian-Triassic-Jurassic lithostratigraphic units in the Campine Basin and the Roer Valley Graben (NE Belgium). *Geologica Belgica*, 4/1-2, 2001.
- [R4-52] N. Vandenberghe, S. Van Simaëys, E. Steurbaut, Stratigraphic architecture of the Upper Cretaceous and Cenozoic along the southern border of the North Sea Basin in Belgium. *Neth. Journal Geosciences* 83 (3) JWM Jagt & PJ Felder, 2004.
- [R4-53] Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, chapter 3. NIROND 2001- 05E, December 2001.

*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-54] M. Schiltz, Lithological and Stratigraphical interpretation by means of cone penetration tests (CPT's) in the Dessel-Kasterlee-Geel-Mol area. Bvba SAMSUFFIT Geoservices, Fieldsurvey cAt 2008.
- [R4-55] S. Louwye & S. De Schepper, The Miocene-Pliocene hiatus in the southern North Sea Basin (northern Belgium) revealed by dinoflagellate cysts. *Geol. Mag.* 000 (0), pp. 1-17, 2010.
- [R4-56] M. Gulinck, S. Geets & J.H. Van Voorthuysen, Note sur les sondages du centre nucléaire à Mol. *Bulletin de la Société belge de Géologie* 72(3), 1964.
- [R4-57] Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J., 1986. Use of Piezometer Cone data. In Clemence, S.P. (Ed), *Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering*, GSP 6, ASCE, Reston, VA, Special Publication, pp 1263-1280.
- [R4-58] F. Gullentops, F. & N. Vandenberghe, Toelichtingen bij de geologische kaart van België. Vlaams Gewest, kaartblad 17 Mol, 1:50.000, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, 1995.
- [R4-59] S. Louwye, S. De Schepper, P. Laga, P. & N. Vandenberghe, The Upper Miocene of the southern North Sea Basin (northern Belgium): a palaeoenvironmental and stratigraphical reconstruction using dinoflagellate cysts. *Geol. Mag.* 144 (1), 2007.
- [R4-60] J. Mertens, The extent of the "Beringen Fault". NIRAS-nota 2004-2601, november 2004.
- [R4-61] H. Van Baelen & M. Sintubin, Evaluation of the Tectonic Activity in the Roer Valley Graben (NE Belgium). NIROND-TR 2006-01, June 2006.
- [R4-62] M. Geluk et al, Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben. *Geologie en Mijn bouw* 73, 1994.
- [R4-63] K. Verbeeck, Studie van de tektonische activiteit van de breuken van Rauw en Poppel. KSB, Afdeling Seismologie, 2001.
- [R4-64] E.F.M. Elewaut ; Integrated interpretation of Geological Geophysical data from well Dessel-1. NIROND 98-03, June 1998.
- [R4-65] Prakla-Seismos; Interprétation Sismique Réflexion 3D, Mol 1978.
- [R4-66] Compagnie Générale de Géophysique ; Tests de sismique réflexion 1991, profil d'essai de Mol. Rapport 131 25 35, 1991.
- [R4-67] Groundexplorer ; Revision of seismic interpretation by using OpendTect software of the 78-3D and 96-ON campaigns of ONDRAF/NIRAS and lines 8416 and 8417 of the PLM-campaign (GSB), Report Groundexplorer 2014.
- [R4-68] K. Verbeeck, L. Wouters, K. Vanneste, Th. Camelbeeck, D. Vandenberghe, K. Beerten, B. Rogiers, M. Schiltz, C. Burrow, F. Mees, J. De Grave & N. Vandenberghe, Episodic activity of a dormant fault in tectonically stable Europe: The Rauw fault (NE Belgium). Submitted to *Tectonophysics*, 2017.
- [R4-69] FANC, Oppervlaktebergingsinrichting, op Belgisch grondgebied, van kortlevend lag- en middelradioactief afval: leidraad "aardbevingen". FANC-MP1-06, 2009.
- [R4-70] L. Reiter; *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. New York, Columbia University Press, 1990.
- [R4-71] A. C. Johnston,, K. J. Coppersmith, L. R. Kanter & C. A. Cornell; *The Earthquakes of Stable Continental Regions. Volume 1: Assessment of Large Earthquake Potential*, Electric Power Research Institute (EPRI). 1994.

- [R4-72] C.A. Cornell, Engineering seismic risk analysis: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 58 (p. 1583–1606), 1968.
- [R4-73] R.K McGuire, FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis: USGS. 1976.
- [R4-74] Th. Camelbeeck, K.Vanneste, P. Alexandre, K. Verbeeck, T. Petermans, P. Rosset, M. Everaerts, M. Warnant, and M. Van Camp, Relevance of active faulting and seismicity studies to assessments of long-term earthquake activity and maximum magnitude in intraplate northwest Europe, between the Lower Rhine Embayment and the North Sea , in Stein, S. and Mazzotti, S. eds., Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues, Geological Society of America, p. 193–224. 2007.
- [R4-75] D. Kusman, P. Alexandre & Th. Camelbeeck; Report on historical seismicity in the Kempen area, 14th – 19th centuries. NIROND-TR 2011-24E, 2011.
- [R4-76] L. Ahorner; Historical seismicity and present-day microearthquake activity of the Rhenish Massif, Central Europe, in Fuchs, K., von Gehlen, K., Mälzer, H., Murawski, H., and Semmel, A. eds., Plateau Uplift, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, p. 198–221, 1983.
- [R4-77] R.J. Geller; Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes. Bulletin of the Seismological Society of America, v. 66, p. 1501–1523. 1976.
- [R4-78] R. Uhrhammer; Characteristics of Northern and Central California Seismicity: Earthquake Notes, v. 57, p. 21, 1986.
- [R4-79] G. Grünthal, C. Bosse & D. Stromeyer; Die neue Generation der probabilistischen seismische Gefährdungseinschätzung der Bundesrepublik Deutschland - Version 2007 mit Anwendung für die Erdbeben-Lastfälle der DIN 19700:2004-07 "Stauanlagen": GeoForschungsZentrum. 2009.
- [R4-80] F. Mulargia, P. Gasperini & S. Tinti; Contour mapping of Italian seismicity: Tectonophysics, v. 142, p. 203–216. 1987.
- [R4-81] D. Leynaud, D. Jongmans, H. Teerlynck & Th.Camelbeeck ; Seismic hazard assessment in Belgium: Geologica Belgica, v. 3, p. 67–86. 2000.
- [R4-82] B. Gutenberg & C.F. Richter; Frequence of earthquakes in California: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 34 (p. 185–188), 1944.
- [R4-83] P. Vancampenhout, M. Duser, C. Baeteman & M. De Ceukelaire; Voorbereidende studie voor de classificatie en cartografie van grondtypes in Vlaanderen volgens EC8, Belgische Geologische Dienst, Brussel, 2009.
- [R4-84] K. Verbeeck, K. Vanneste & T. Camelbeeck, 2013. Velocity profiles extrapolation in the Campine Basin, Belgium. Brussels, 36 p. Technical report Royal Observatory of Belgium, 05/12/2013.  
([https://www.researchgate.net/publication/290097764\\_Velocity\\_profiles\\_extrapolation\\_in\\_the\\_Campine\\_Basin\\_Belgium](https://www.researchgate.net/publication/290097764_Velocity_profiles_extrapolation_in_the_Campine_Basin_Belgium)).
- [R4-85] NIRAS-nota 2018-1220: Sonic Logging field report, Smet-Fish borehole, April 2014.
- [R4-86] E. Delavaud, F. Cotton, S. Akkar, F. Scherbaum, L. Danciu, C. Beauval, S. Drouet, J. Douglas, R. Basili, M.A. Sandikkaya, M. Segou, M. E. Faccioli, & N. Theodoulidis; Toward a ground-motion logic tree for probabilistic seismic hazard assessment in Europe: Journal of Seismology, v. 16, p. 451–473, doi: 10.1007/s10950-012-9281-z. 2012.
- [R4-87] S. Akkar, M. Sandikkaya & J.J. Bommer; Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East: Bulletin of Earthquake Engineering, doi: 10.1007/s10518-013-9461-4. 2013.



*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-88] E. Faccioli, A. Bianchini & M. Villani, M; New ground motion prediction equations for  $t > 1$ s and their influence on seismic hazard assessment, *in* Proceedings of the University of Tokyo Symposium on Long-Period Ground Motion and Urban Disaster Mitigation, Tokyo, Japan. 2010.
- [R4-89] G.M. Atkinson & DM Boore; Modifications to Existing Ground-Motion Prediction Equations in Light of New Data: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 101, p. 1121–1135, doi: 10.1785/0120100270. 2011.
- [R4-90] K. W. Campbell, K.W; Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in Eastern North America: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 93 (p. 1012–1033), 2003.
- [R4-91] G.R. Toro; Modification of the Toro et al. (1997) attenuation equations for large magnitudes and short distances. 2002.
- [R4-92] M. Pagani, D. Monelli, G. Weatherill, L. Danciu, H. Crowley, V. Silva, P. HenshawL. Butler, M. Nastasi, L. Panzeri, M. Simionato & D.Vigano, OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model: Seismological Research Letters, v. 85, p. 692–702, doi: 10.1785/0220130087, 2014.
- [R4-93] P.B. Schnabel, J. Lysmer & H.B. Seed; SHAKE – A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, 1972.
- [R4-94] K. Fuchs & G. Muller; Computation of synthetic seismograms with the reflectivity method and comparison with observations. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 23 (4), p. 417-433. 1971.
- [R4-95] B.L.N. Kennett; Seismic Wave Propagation in Stratified Media. ANU E-press, Canberra (288 p), 1983.
- [R4-96] K. Verbeeck, K. Vanneste & Th. Camelbeeck; Velocity profiles extrapolation in the Campine Basin, Belgium. 2013.
- [R4-97] R.S. Westerhoff, V. van Hoegaerden & L.Wouters; Geotechnical Exploration of a possible Storage Ground Area (Dessel, Belgium). Using surface waves for exploring the shallow subsurface. 2002.
- [R4-98] T.K. Ter Burg; Borehole seismic survey summary (Dessel-1), Schlumberger, The Hague, NEJ-N171818/40, 1993.
- [R4-99] W.R. Weist; Well Mol-1: Check shot survey, sonic calibration, synthetic seismograms – Processing report, Schlumberger, Hannover, H11887WR, 1997.
- [R4-100] N. Vandenberghe, M. Duser, P. Boonen, S.F. Lie, R. Voets & J. Bouckaert; The Merksplas-Beerse geothermal well (17W265) and the Dinantian reservoir. Geologica Belgica, v. 3 (p. 349–367), 2000.
- [R4-101] P.W. Mayne; Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests, *in* International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories, Bali, Indonesia, p. 27–48, 2001.
- [R4-102] P. Rosset & T. Petermans; Guidelines of used and developed tools for numerical modelling in one dimension. Royal Observatory of Belgium, 2006.
- [R4-103] Th. Richir, Seismic response spectra at the ground surface. Tractebel Engineering TS021-NTE-3-004, 2011.
- [R4-104] Het bekkenbeheerplan van het Netebekken (2008-2013); Integraal waterbeleid in de praktijk. Secretariaat Netebekken, D/2009/6871/012.
- [R4-105] K. Vandersteen, M. Gedeon & D. Mallants, Beschrijving van de regionale en lokale hydrologie van het oppervlaktewater met betrekking tot de site voor berging van laag-radioactief afval te Dessel. External Report SCK•CEN-ER-172, 2011.

*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-106] AEOLUS, Milieueffectrapport kwartzandontginning Dessel SCR Sibelco NV, 409 pp., 2001.
- [R4-107] SCK•CEN, Hydrogeological model for the safety evaluation: groundwater flow and transport calculations for the nuclear zone Mol-Dessel (2nd iteration), SCK•CEN report R-3797 03/MGe/P-64, Januari 2004.
- [R4-108] Debietmetingen in het bekken van de Kleine Nete, SORESMA, IN: 1261663000/lvp. 2009.
- [R4-109] Vlaamse Milieumaatschappij, databank oppervlaktewater, [www.hydronet.be](http://www.hydronet.be).
- [R4-110] Het Hydrologisch Informatiecentrum, [hic@vlaanderen.be](mailto:hic@vlaanderen.be).
- [R4-111] Besluit van de Vlaamse Regering houdende de vaststelling van de bekkenbeheerplannen overeenkomstig artikel 48 van het decreet van 18 juli 2003 betreffende het integraal waterbeleid. Belgisch Staatsblad 30 januari 2009.
- [R4-112] Nationaal Geografisch Instituut. Ferraris Digitaal bestand, kaartbladen Kasterlee (125), Geel (126), Postel (145) en Mol (146). NGI, Brussel.
- [R4-113] O. Batelaan. & F. De Smedt, GIS-based recharge estimations by coupling, surface-subsurface water balances, J. of Hydrology, 337, 337-355, 2007.
- [R4-114] Leterme B. & Mallants D., Climate and land use change impacts on groundwater recharge, ModelCARE 2011. Models – Repositories of knowledge UFZ, Leipzig, 18 – 22 September 2011.
- [R4-115] AROL, Modellen integraal waterbeheer Vlaams Gewest, Eindverslag (deel 20), 1990.
- [R4-116] Feyen J., Vandamme J., Haghedooren E., Willems A., Bepaling van het landbouwkundig watergebruik en de nuttige neerslag ten behoeve van het grondwaterbeleid in de provincie Antwerpen, KULeuven, Fac. Landbouwwetenschappen, 1978.
- [R4-117] Bladt A., Byloos J., Demarée G., Van Der Beken A., Grondwaterbeleid in de provincie Antwerpen – Deel III : Hydrologische balansen, 1977.
- [R4-118] Cnudde J-P, Hydrogeologische studie van het plasseengebied van Mol, RUGent Fac. Wetenschappen, 1978.
- [R4-119] Hardy, L., Mallants, D. and Volckaert, G., Hydrogeological model for the safety evaluation: groundwater flow and transport calculations for the nuclear zone Mol-Dessel, Surface disposal of category A waste, SCK•CEN-R-3550, 2001.
- [R4-120] Baetslé, L., Maes, W.F., Souffriau, K., and Staner, P.I., Migration de radio-éléments dans le sol, EUR 2481.F, 1966.
- [R4-121] VITO, Hydrodynamisch model : Submodel : site Mol/Dessel/Geel, 2000.
- [R4-122] Verbeiren, B., Batelaan, O and De Smedt, F., Ontwikkelen van regionale modellen ten behoeve van het Vlaams Grondwater Model (VGM) in GMS/MODFLOW. Perceel nr. 1: Centraal Kempisch Model. Deelrapport 2: Opbouw van het grondwaterstromingsmodel, gevoeligheidsanalyse en calibratie, Vrije Universiteit Brussel, 2006.
- [R4-123] SCK•CEN, Simulation of evapotranspiration and groundwater recharge in the Nete catchment accounting for different land cover types and for present and future conditions, report ER-192, (Leterme B., Mallants D); 2012.
- [R4-124] Dams J., et al. , Mapping impervious surface change from remote sensing for hydrological modeling." Journal of Hydrology 485(0): 84-95, 2013.
- [R4-125] AGIV, Agentschap voor Geografische Informatie Vlaanderen, available on [www.agiv.be/gis](http://www.agiv.be/gis) (accessed August 25th, 2011).

- [R4-126] M. Gulinck; Essai d'une carte géologique de la Campine. Etat de nos connaissances sur la nature des terrains néogènes recoupés par sondages. Mémoires de la Société belge de Géologie, Paléontologie et Hydrologie 6. , 1962.
- [R4-127] Rogiers B, Vienken T, Gedeon M, Batelaan O, Mallants D, Huysmans M, Dassargues A.. Multi-scale aquifer characterization and groundwater flow model parameterization using direct push technologies. *Environmental Earth Sciences* 72(5): 1303-1324. 2014.
- [R4-128] Rogiers B. Multi-scale aquifer characterization: from outcrop analogue, direct-push and borehole investigations towards improved groundwater flow models. PhD thesis, Faculty of Science, KU Leuven, 234 pp. - D/2013/10.705/87. 2013.
- [R4-129] Rogiers B, Beerten K, Smeekens T, Mallants D, Gedeon M, Huysmans M, Batelaan O, Dassargues A. Derivation of flow and transport parameters from outcropping sediments of the Neogene aquifer, Belgium. *Geologica Belgica* 16(3): 129-147. 2013.
- [R4-130] Rogiers B, Mallants D, Batelaan O, Gedeon M, Huysmans M, Dassargues A. Estimation of hydraulic conductivity and its uncertainty from grain-size data using GLUE and artificial neural networks. *Mathematical Geosciences* 44(6): 739-763. 2012.
- [R4-131] Lebbe L; Interpretatie van een pompproef uitgevoerd te Mol. Rapport UGent, Vakgroep Geologie en Bodemkunde, nr. GROMO 2002/07. 2002.
- [R4-132] J.J. Butler & P. Dietrich P; New methods for high-resolution characterization of spatial variations in hydraulic conductivity. In: International Symposium on Hydrogeological Investigation and Remedial Technology, Jhongli, Taiwan, pp 42–55. 2004.
- [R4-133] P. Dietrich P, J.J. Butler & K. Faiss; A rapid method for hydraulic profiling in unconsolidated formations. *Ground Water* 46(2):323–328. 2008.
- [R4-134] G. Liu G, J.J. Butler, G.C. Bohling GC, E. Reboulet, S. Knobbe & D.W. Hyndman; A new method for high-resolution characterization of hydraulic conductivity. *Water Resour Res* 45(8):1–6. 2009.
- [R4-135] S.C. Lesoff, U. Schneidewind, C. Leven, P. Blum, P. Dietrich & G. Dagan; Spatial characterization of the hydraulic conductivity using direct-push injection logging. *Water Resour Res* 46(12):1–9. 2010.
- [R4-136] Liu G, Butler JJ, Reboulet E, Knobbe S., Hydraulic conductivity profiling with direct push methods. *Grundwasser* 17(1):19–29. doi:10.1007/s00767-11-182-9. 2011.
- [R4-137] GEOPROBE hydraulic profiling tool (HPT) systems: standard operating procedure. Technical Bulletin MK3137, GEOPROBE. 2007.
- [R4-138] McCall W, Christy TM, Christopherson T, Issacs H, Application of direct push methods to investigate uranium distribution in an alluvial aquifer. *Ground Water Monit Remediat* 29(4):65–76. 2009.
- [R4-139] Köber R, Hornbruch G, Leven C, Tischer L, Grossmann J, Dietrich P, Weiss H, Dahmke A, Evaluation of combined direct-push methods used for aquifer model generation. *Ground Water* 47(4):536–546. doi:10.1111/j.1745-6584.2009.00554. 2009.
- [R4-140] Butler JJ, A simple correction for slug tests in small-diameter wells. *Ground Water* 40(3):303–308. 2002.

*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-141] Butler JJ, Healey JM, McCall GW, Garnett EJ, Loheide SP II, Hydraulic tests with direct-push equipment. *Ground Water* 40(1):25–36. 2002.
- [R4-142] VMM, Grondwater in Vlaanderen: het Centraal Kempisch Systeem. Uitgave 01-06-2008. 2008.
- [R4-143] Vandersteen, K., Gedeon, M., & Beerten, K. A synthesis of hydraulic conductivity measurements of the subsurface in Northeastern. *Geologica Belgica*, 17(3–4), 196–210. 2014.
- [R4-144] Hoedemaekers, T., Slug- en dilutietesten in de Neogene aquifer, in en rond de nucleaire zone te Mol-Dessel- Geel. Unpublished BSc thesis, Faculty of Science, KU Leuven, 42 pp. 2015.
- [R4-145] Rogiers B, Beerten K, Smeekens T, Mallants D, Gedeon M, Huysmans M, Batelaan O, Dassargues A., The usefulness of outcrop analogue air permeameter measurements for analysing aquifer heterogeneity: testing outcrop hydrogeological parameters with independent borehole data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 5155-5166. 2013.
- [R4-146] Meyus Y, Helsen S; Multi en enkelvoudige pomptests in en rond de nucleaire zone van Mol-Dessel: Terreinverkenningen 2008. NIROND-TR 2012-19, 2012.
- [R4-147] Rogiers B, Vandersteen K, Labat S, Beerten K, Gedeon M., Water table mapping at the cAt site. SCK•CEN/12758018 R-6147. 2016.
- [R4-148] Rogiers B, Labat S, Gedeon M, Vandersteen K., Eastern tumulus winter campaign. SCK•CEN/12578410 R-6129. 2016.
- [R4-149] Rogiers B, Labat S, Gedeon M, Vandersteen K., Eastern tumulus spring campaign. SCK•CEN/17904546 R-6172. 2016.
- [R4-150] Rogiers B & Gedeon M., Proposal for new measurements for the eastern tumulus. SCK•CEN Note SCK•CEN/6545432. 2015.
- [R4-151] Rogiers B, Labat S, Gedeon M, Vandersteen K., Eastern tumulus fall campaign. SCK•CEN/20399222 R-6236. 2017.
- [R4-152] Labat S, Rogiers B., Bepaling van de XYZ-coördinaten van een aantal cAt-peilputten. SCK•CEN/22502567 T-0049, 2017.
- [R4-153] Long, A. J., RRAWFLOW: Rainfall-response aquifer and Watershed Flow Model (v1.15). *Geoscientific Model Development*, 8(3), 865–880. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-865-2015>. 2015.
- [R4-154] Jakeman, A. J. and Hornberger, G. M.: How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model?, *Water Resour. Res.*, 29, 2637–2649, 1993.
- [R4-155] Byrd, R. H., Lu, P., Nocedal, J. and Zhu, C. , A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM J. Scientific Computing*, 16, 1190–1208, 1995.
- [R4-156] Rogiers B, Labat S, Gedeon M, Vandersteen K., Eastern tumulus summer campaign. SCK•CEN/19590237 R-6191. 2017.
- [R4-157] <http://www.waterinfo.be/default.aspx?path=NL/Thema/Neerslag>.
- [R4-158] <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen>.
- [R4-159] Hall, SH, "Single Well Tracer Tests in Aquifer Characterization". In: *Ground Water Monitoring & Remediation*. 1993.
- [R4-160] Palmer, CD, "Borehole dilution tests in the vicinity of an extraction well". In: *Journal of Hydrology* 146.1993, pp. 245–266. 1993.

- [R4-161] Rogiers B, Labat S, Gedeon M., An assessment of dilution tests and ambient temperature logging for quantifying groundwater flow in the Neogene aquifer. SCKCEN-ER-276. 2015.
- [R4-162] Halevy, E, H Moser, O Zellhofer, and A Zuber, Borehole dilution techniques: a critical review". In: Isotopes in Hydrology, I.A.E.A., Vienna, pp. 531-564. 1967.
- [R4-163] Bidaux, P and CF Tsang, Fluid flow patterns around a well bore or an underground drift with complex skin effects". In: Water Resources Research 27.11, pp. 2993-3008. 1991.
- [R4-164] K. Beerten & D. Mallants, Geomorphology and hydrology of a sediment-soil sequence in Dessel; studying natural analogues for engineered earth cover, SCK•CEN-ER-180, 2011.
- [R4-165] Vlaamse Gemeenschap, Decreet betreffende het integraal waterbeleid van 18 juli 2003, Belgisch Staatsblad blz. 55038-55077, 14 november 2003.
- [R4-166] M. Gedeon & D. Mallants, Hydrogeological model for the safety evaluation – Groundwater flow and transport calculations for the nuclear zone Mol-Dessel, SCK•CEN-R-3797, 2004.
- [R4-167] VMM, Analyse van de grondwaterwinningen voor het inschatten van opgepompte debieten op basis van de vergunde debieten, 2011, niet gepubliceerd.
- [R4-168] Rutledge, A.T., 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data – update, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4148, 1998.
- [R4-169] ONDRAF/NIRAS, Basisontwerp voor definitieve oppervlakteberging van laagactief en kortlevend afval (Cat. A) in de gemeente DESSEL", Tractebel Development Engineering, Specifieke Technische nota, 94815\_001/TEC/NTE/Basisconcept\_stola1\_rev2\_reduced, Januari 2003.
- [R4-170] Richtlijnen voor de toepassing van Eurocode 7 in België: het grondmechanisch ontwerp van kerende constructies: beschoeiingen, WTCB, versie 19/03/2015.
- [R4-171] N. Vandenberghe, Qualitative and quantitative mineralogical analyses. GEOS-NIRAS Samples, Lab for Applied Geology and Mineralogy, KULeuven, April 2009.
- [R4-172] D. Mallants, A. Dierckx, G. Volckaert, L. Wang, and Th. Zeevaert, Impact assessment of the radium storage facility at Olen. Part 1: Safety data and migration study. Report R-3478, SCK•CEN, Mol, Belgium, 2001.
- [R4-173] AMINAL, Grondwaterkwaliteit in de Provincie Antwerpen, 1995.
- [R4-174] C.A.J. Apello, D. Postma, Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd Edition. A.A. Balkema Publishers, Leiden, 649 pp., 2006.
- [R4-175] M. Geyh, Environmental isotopes in the hydrological cycle, Volume IV Groundwater – Saturated and unsaturated zone. International Hydrological Programme, Technical Documents in Hydrology, No. 39, Vol. IV, UNESCO, Paris, 2000.
- [R4-176] I. Clarck, P. Fritz, Environmental Isotopes in Hydrology, Lewis Publishers, New York, 328 pp., 1997.
- [R4-177] C. Beaucaire, H. Pitsch, P. Toulhoat, S. Motellier, D. Louvat, Regional fluid characterisation and modelling of water-rock equilibria in the Boom Clay Formation and in the Rupelian aquifer at Mol, Belgium. Applied Geochemistry, 15, 667-686, 2000.
- [R4-178] EPA, Understanding variation in partition coefficient, K<sub>d</sub>, values, Volume II: EPA 402-R-99-004B, US-EPA, 1999.

*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-179] J. Marivoet, I. Van Keer, I. Wemaere, L. Hardy, H. Pitsch, C. Beaucaire, J.L. Michelot, C. Marlin, A.C. Phillipot, M. Hassanizadeh, F. van Weert, A Palaeohydrogeological study of the MOL site (PHYMOL Project) – European Commission Nuclear Science and Technology, Contract No FI4W-CT96-0026, Final report.
- [R4-180] F. Hardeman, M. Loos, C. Rojas Palma, J. Ruts, A. Sohier, C. Vandecasteele, R. Bubbe, Paridaensand J.-L. Genicot, Studie van de radiologische toestand van de site Mol-Dessel, SCK•CEN R-3675, 2002.
- [R4-181] UNSCEAR 2000, Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly of the United Nations with Scientific Annexes, United Nations sales publication E.00.IX.3, New York.
- [R4-182] FANC, Radiological monitoring in Belgium summary report 2009. Surveillance of the territory and natural radiation service, 2009.
- [R4-183] J.P. Deworm, W. Slegers, J. Gillard, J.M. Flemal, J.P. Culst, Survey of the natural radiation of Belgian territory as determined by different methods. Radiation Protection Dosimetry, 24, 347-351, 1988.
- [R4-184] Project-MER berging. Een geïntegreerd project van oppervlakteberging in Dessel voor het Belgisch laag- en middelactief kortlevend afval. ARCADIS, 22/000994, Oktober 2012.
- [R4-185] R16-4, Jaarverslag radioactieve atmosferische lozingen Belgoproces 2010, ref. VEM/2011-01556, 11 juni 2011.
- [R4-186] FANC, Radiologisch toezicht in België – Syntheseverlag 2013, September 2014.
- [R4-187] R16-4, Jaarverslag radioactieve atmosferische lozingen Belgoproces 2010, ref. VEM/2011-01556, 11 juni 2011.
- [R4-188] F. Gullentops & L. Wouters, Delfstoffen in Vlaanderen. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement EWBL 1996.
- [R4-189] V. Langenaeker, The Campine Basin: stratigraphy, structural geology, coalification and hydrocarbon potential for the Devonian to Jurassic. Leuven University Press. 142 p., 2000.
- [R4-190] M. Duser, R. Dreesen, B. Laenen & M. Mostade Assessing Belgium's CBM potential, Coalbed Methane Review, 5/3, 8-11, 1999.
- [R4-191] A. Berckmans & N. Vandenberghe, Use and potential of geothermal energy in Belgium. Geothermics, 27, 235-242, 1998.
- [R4-192] R. Dreesen & B. Laenen, Technology watch: geothermie en het potentieel in Vlaanderen – eindrapport. Studie uitgevoerd in opdracht van ALBON, 2010/SCT/R/001, 2010.
- [R4-193] Bos S. & Laenen B., 2017. Development of the first deep geothermal doublet in the Campine Basin of Belgium. European Geologist, 43, p. 16-20.
- [R4-194] M. Duser & L. Wouters, "Een stapsgewijze geologische exploratie voor ondergrondse gasstockering". In "De aarde als fundament", ed. N. Vandenberghe & P. Laga, ACCO, 1991.
- [R4-195] R. Dreesen, J. Bouckaert, M. Duser, J. Soille & N. Vandenberghe, Subsurface structural analysis of the Late-Dinantian carbonate shelf at the northern flank of the Brabant Massif (Campine Basin, Belgium). Mém. Expl. Cartes Géologiques et Minières de Belgique, nr. 21, 1987.
- [R4-196] K. Piessens, B. Laenen, W. Nijs, P. Mathieu, J.-M. Baele, C. Hendriks, E. Bertrand, J. Bierkens, R. Brandsma, M. Broothaers, E. de Visser, R. Dreesen, S. Hildenbrand, D. Lagrou, V. Vandeginste & K. Welkenhuysen, Policy

#### Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving

##### Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel

- support system for carbon capture and storage “PSS-CCS”, Final Report Phase 1, Belgian Science Policy 2009, Research Program Science for a Sustainable Development, 268 pp, 2009.
- [R4-197] K. Piessens & M. Dusar, Integration of CO<sub>2</sub> sequestration and CO<sub>2</sub> geothermics in energy systems for abandoned coal mines. *Geologica Belgica*, 7/3-4, 181-189, 2004.
- [R4-198] K. Welkenhuysen, K. Piessens, J.M. Baele, B. Laenen & M. Dusar, CO<sub>2</sub> storage opportunities in Belgium. *Energy Procedia*.  
<https://www4.eventsinteractive.com/iea/viewpdf.esp?id=270025&file=\\DCFILE01\EP11%24\Eventwin\Pool\office27\dcs\pdf\ghgt10Final01036.pdf> , 2010.
- [R4-199] ONDRAF/NIRAS, Final Cover and Test Cover Principles, Design and Implementation. Project near surface disposal of category A waste at Dessel. NIROND-TR-2010-79, 2012.
- [R4-200] Fiche grind, <https://www.lne.be/grindbeleid#standvanzaken>.
- [R4-201] ARCADIS, Kaderplan Kempense Meren, December 2009 (04/006269).
- [R4-202] ONDRAF/NIRAS; Verslag van de werkvergadering mbt de stratigrafische indeling van boring Dessel 2. Nota 2003-2819 (A. berckmans & L. Wouters), 2003.
- [R4-203] R. Berten, P. Hermans & D. Paelinckx, Biologische waarderingskaart – Verklarende tekst bij kaarten 3-9-17, Mededelingen van het Instituut voor Natuurbehoud 9, 125 pp. + 25 kaartbladen, Brussels, 2000.
- [R4-204] J. Lambrechts, P. Hendrickx, J. Gabriëls, M. Jacobs, A. De Vocht & P. T. Hendig, Ontwikkeling van het geïntegreerd cat A bergingsconcept te Dessel en Mol – Ecologische inventarisatie van de fauna en flora in de nucleaire zone ten noorden van het kanaal Bochoolt-Herentals, Arcadis Belgium in opdracht van NIRAS vzw, 15 May 2009.
- [R4-205] F. Vleugels, Gemeentelijk Natuur Ontwikkelingsplan – Mol — Milieudienst Stad Mol, 1996.
- [R4-206] S. Sneyers & G. Vanhorebeek, Gemeentelijk Natuur Ontwikkelingsplan – Dessel — Intercommunale ontwikkelingsmaatschappij voor de Kempen (IOK), 1996.
- [R4-207] L. P. C. Verbeke, Forest and forestry in Flanders, Educatief Bosbouwcentrum Groendaal, Groendaal, 6p., 1996.
- [R4-208] D. Maes, D. & H. Van Dyck, Dagvlinders in Vlaanderen - Ecologie, verspreiding en behoud. Stichting Leefmilieu i.s.m. Instituut voor Natuurbehoud en Vlaamse Vlinderwerkgroep, Antwerpen/Brussel, 1999.
- [R4-209] G. de Knijf, A. Anselin, P. Goffart & M. Tailly, De libellen (Odonata) van België: verspreiding – evolutie – habitats. Libellenwerkgroep Gomphus/Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel, 2006.
- [R4-210] K. Declerck, H. Devriese, K. Hofmans, K. Lock, B. Barenburg, & D. Maes, Voorlopige atlas en 'rode lijst' van de sprinkhanen en krekels van België (Insecta, Orthoptera). SALTABEL i.s.m. IN en KBIN, Brussel, 2000.
- [R4-211] T. Adriaens, G. San Martín y Gomez, D. Maes, Invasion history, habitat preferences and phenology of the invasive ladybird *Harmonia axyridis* in Belgium *BioControl* 53(1): 69-88, 2008.
- [R4-212] K. Desender, W. Dekoninck, D. Maes, L. Crevecoeur, M. Dufrêne, M. Jacobs, J. Lambrechts, M.; Pollet, E. Stassen, N. Thys, Een nieuwe verspreidingsatlas van de loopkevers en zandloopkevers (Carabidae) in België. [INBO.R.2008.13]. Rapporten van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, 2008(13). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek: Brussel : Belgium. 184 pp. 2008.

*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

- [R4-213] W. Dekoninck, F. Vankerkhoven, & J.-P. Maelfait, Verspreidingsatlas en voorlopige Rode Lijst van de mieren van Vlaanderen. Instituut voor Natuurbehoud, Brussel, 2003.
- [R4-214] Vermeersch G., A. Anselin, K. Devos, M. Herremans, J. Stevens, J. Gabriëls & B. Van der Krieken, 2004. Atlas van de Vlaamse broedvogels 2000-2002. Mededelingen van het Instituut voor Natuurbehoud 23, Brussel, p. 60-75.
- [R4-215] L. Bervoets, A. Schneiders & C. Wils, Onderzoek naar de verspreiding en de typologie van ecologisch waardevolle waterlopen in Vlaanderen : Netebekken, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, departement Leefmilieu en Infrastructuur (LIN), Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer (AMINAL), Afdeling Water, Brussel : Belgium, 38 pp., 1996.
- [R4-216] M. Dumortier, L. De Bruyn, J. Peymen, A. Schneiders, T. Van Daele, G. Weyembergh & D. Van Straaten, Natuurrapport 2003 : toestand van de natuur in Vlaanderen : cijfers voor het beleid, Mededeling van het Instituut voor Natuurbehoud 21, Instituut voor Natuurbehoud, Brussel, Belgium. ISBN 90-403-0178-8, 352 pp., 2003.
- [R4-217] M. Dumortier, L. De Bruyn, M. Hens, J. Peymen, A. Schneiders, T. Van Daele, W. Van Reeth & G. Weyembergh, Biodiversity indicators 2006 : the state of nature in Flanders (Belgium), Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel, Belgium, ISBN 90-403-0251-0, 44 pp., 2006.
- [R4-218] ONDRAF/NIRAS, Seismotectonic zones for probabilistic seismic-hazard assessment in Belgium. NIROND-TR 2008-31E (K. Verbeeck, K. Vanneste & Th. Camelbeeck), 2009.
- [R4-219] ONDRAF/NIRAS, Overview of the field investigations in and around the nuclear site of Mol-Dessel. NIROND-TR 2011-42E (L. Wouters & M. Schiltz), 2012.
- [R4-220] SCK•CEN, Fysische geografie van het netebekken en omgeving. SCK-rapport BLG-1078 (K. Beerten), 2011.
- [R4-221] SCK•CEN, Bijkomende sitekarakterisatie voor de nucleaire zone Mol-Dessel: bepaling van de hydrogeologische parameters. SCK-rapport R-3703 (D. Mallants, S. Labat & M. Gedeon), 2003.
- [R4-222] Kaart overstromingsgevoelige gebieden, [www.watertoets.be](http://www.watertoets.be) (geraadpleegd in 2011).
- [R4-223] Van Tongeren P., Laenen B. & Dreesen R; Het koolbedmethaanpotentieel in Vlaanderen en de mogelijkheden tot geologische opslag van CO<sub>2</sub> in relatie tot de winning van deze gasreserves. Vito-Rapport 2000/ETE/R/028, 2000.



### **Bijlage 1-1: Lijst van gebruikte afkortingen**

a	annum / jaar
ARBIS	Algemeen Reglement op de Bescherming van de bevolking, van de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van Ioniserende Stralingen
AWZ	Administratie van Waterwegen en Zeewezen
BFI	Base Flow Index
BIOCLIM	modelling sequential BIOSphere systems under CLIMate change for Radioactive waste disposal
CCI-HYDR	Climate Change Impact on HYdrological extremes along rivers and urban DRainage systems
CPT	Cone Penetration Test of diepsondering
DBE	Design Basis Earthquake / ontwerpaardbeving
BDBE	Beyond Design Basis Earthquake / buiten ontwerpaardbeving
DOV	Diepe Ondergrond Vlaanderen
DTM	Digitaal Hoogtemodel
E	Oost
ET	Evaporatie en Transpiratie
FANC	Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle
FBFC	Franco-Belge de Fabrication de Combustile
Fm	Formatie
GDB	Geologische Dienst van België
GMPE	Ground Motion Prediction Equation / grondbewegingsmodel
GTF	GeoTransfer Factor
I	Infiltratie
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer
IDF	Intensiteit-duurtijd-frequentiecurve
IMDC	International Marine & Dredging Consultants
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPM	Installatie voor de Productie van Monolieten
KBIN	Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen
KMI	Koninklijk Meteorologisch Instituut van België
kmo	Kleine en Middelgrote Ondernemingen

*Hoofdstuk 4 Karakteristieken van de site en haar omgeving*

*Veiligheidsrapport voor de oppervlaktebergingsinrichting van categorie-A afval te Dessel*

KSB (-ORB)	Koninklijke Sterrewacht van België – Observatoire Royal de Belgique
MFD	Magnitude Frequency Distribution
MI-Pd-Bs	Formaties van Mol-Poederlee-Brasschaat
Mmax	Maximale Magnitude
Ms	Magnitude van de oppervlaktegolf
N	Noord
NIS	Het Nationaal Instituut voor Statistiek
NAM	Neogeen Aquifer Model
P	Neerslag
PGA	Peak Ground Acceleration / peakgrondversnelling
PGV	Peak Ground Velocity / Piekgrondsnelheid
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Assessment / seismische gevarenkans
R <sub>JB</sub>	Joyner-Boore afstand (kortste horizontale afstand tot de oppervlakteprojectie van het ruptuurvlak)
R <sub>rup</sub>	ruptuurafstand
S	Zuid
SFC	Safety & Feasibility Case
SCR	Stabiele Continentale regio
SCR-ext	Extensionele, actieve korst SCR
SD	Standaarddeviatie
TAW	Tweede Algemene Waterpassing
HADES-URF	High Activity Disposal Experimental Site for Radioactive Waste – Underground Research Facility
VITO	Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek
VLAREM	Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunning
Vs	Schuifgolfsnelheid
VSP	Vertical Seismic Profile
W	West

**NIRAS**

**Nationale instelling voor radioactief afval  
en verrijkte splijtstoffen**

**Kunstlaan 14**

**BE-1210 Brussel**

**Tel. + 32 2 212 10 11**

**Fax +32 2 218 51 65**

**[www.nirond.be](http://www.nirond.be)**