

Nota Grondwater

Verkennde analyse op effect verzilting grondwater

Raamovereenkomst zaaknummer 31151860

Onderzoek en Monitoring VNSC: Data-analyse en data-modelleringsdiensten (perceel 2)

Nadere overeenkomst NOK-KGT2 Verkennde inschatting effecten van verzilting KGT met contractnummer 31170651

Voor de Vlaams-Nederlandse Scheldecommissie

Contactpersonen	Eric van Zanten Laurens Hermans
-----------------	------------------------------------

Projectmedewerkers

Antea Group	Lore Vanhooren Mirjam Stark Luka Tas Stef Michielsen Ivo Van de Moortel Philippe Hyde
-------------	--

Datum oplevering rapport v1.0: 10 december 2021

Datum oplevering rapport v2.0: 20 december 2021

INHOUDSOPGAVE

1.	Inleiding	3
2.	Drainerend karakter KGT en zijstromen.....	4
2.1.	Methodiek	4
2.2.	Data	5
2.3.	Analyse	5
2.4.	Besluit Drainerend/Infiltrerend Karakter	8
3.	Verzilting grondwater.....	9
3.1.	Methodiek en achtergrond	9
3.2.	Transecten	11
3.3.	Hydrogeologie.....	12
3.4.	Analyse	15
3.4.1.	Bodemweerstand kanaal.....	15
3.4.2.	Dichtheidsstroming	18
3.4.3.	FRESHEM & Badon-Ghyben Hertzberg	19
3.5.	Besluit Verzilting Grondwater	24

1. Inleiding

Indien de grondwaterstroming niet wijzigt zal een verdere verzilting van het kanaal nauwelijks impact hebben op de landbouw die voornamelijk gebruik maakt van zoetwater lenzen. Volgens het MER (Pfaff & Wagenaer, 2015) zal men ook tijdens het W+ scenario jaargemiddeld onder de grens van 5000 mg/L blijven. Eens men boven deze grens gaat durft geen enkele bestaande publicatie of rapport zich uit te spreken over mogelijke effecten in het gebied van KGT. Wijzigingen in het grondwaterpatroon t.g.v. dichtheidsstromingen zijn dan niet uit te sluiten. Daarom wordt een **verkennende studie** uitgevoerd om te evalueren wat het effect is indien het grondwater tot boven de grens van 5000 mg/L Chloride evolueert. Op basis van deze verkenning, kan men later nog beslissen of een bijkomende grondwatermodellering aan de orde is.

In het MER, en andere grondwaterstudies uitgevoerd op Kanaal Gent-Terneuzen (KGT), wordt altijd impliciet aangenomen dat het kanaal en zijn geconnecteerde zijlopen louter infiltreren in Nederland en louter draineren in België. De scheiding wordt dan ook altijd gelegd op de Belgisch-Nederlandse grens. Onderbouwende studies kunnen hier echter niet over gevonden worden. Daarom wordt eerst kort bekeken als deze stelling geldig is: zijn het kanaal en de zijlopen daadwerkelijk volledig drainerend in België of hebben we een (gedeeltelijk) infiltrerend karakter?

De **onderzoeksvragen** zijn dus:

1. Wat als chloridegehalte hoger komt te liggen dan 5000 mg/l: verkrijgt men dan wel aanzienlijke wijziging in de grondwaterstroming? En kan dit bijgevolg wel een impact hebben op de landbouw die nu volledig berust op de zoetwaterlenzen?
2. Is het KGT daadwerkelijk louter infiltrerend in Nederland en puur drainerend in België zoals standaard wordt aangenomen? Speelt de verziltingsproblematiek van het grondwater met andere woorden enkel in Nederland?

2. Drainerend karakter KGT en zijstromen

2.1. Methodiek

Om te bepalen als het kanaal of rivier een infiltrerend of drainerend karakter heeft, vergelijken we het relatief verloop van het grondwaterpeil met het oppervlaktewaterpeil. Dit bekijken we voor het kanaal zelf en de belangrijke, geconnecteerde zijlopen. Uit de ruimtelijke analyse (Vanhooren *et al.*, 2021) blijkt dat enkel de Moervaart verzilt is. Op de Averijvaart merken we nauwelijks het effect van de verzilting van KGT. De Averijvaart wordt hier dan ook buiten beschouwing gelaten.

Gezien er geen grondwaterpeilmetingen beschikbaar zijn nabij de Nederlandse grens – en het hier een verkennende studie betreft – wordt een vereenvoudigde methode toegepast. Hier vergelijken we de gemiddeld hoogst grondwaterstand (GHG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) met het oppervlaktepeil. Een inschatting van de GXG's (karakteristieke waterstanden, o.m. de GHG en GLG) wordt gemaakt op basis van het bodemtype waarbij het gemiddeld peil t.o.v. maaiveld afhankelijk is van de textuur- en drainageklasse (Tabel 1).

Tabel 1: Gemiddeld hoogste en laagste grondwaterpeil op basis van het bodemtype, naar Van Ranst & Seys (2000).

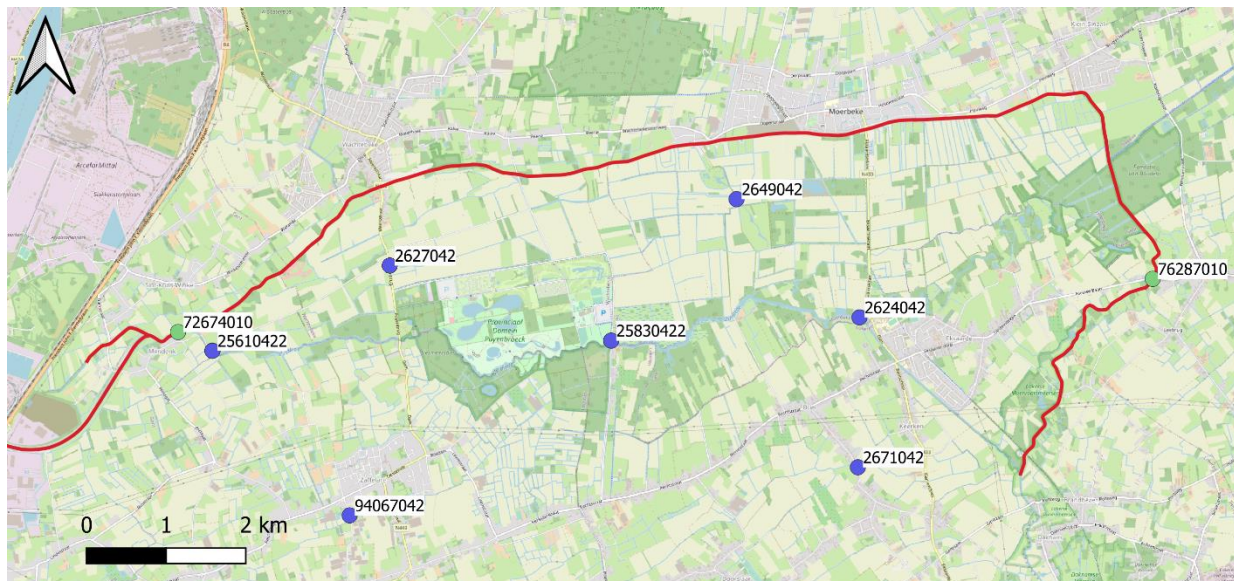
Drainageklasse	Zware texturen		Lichte texturen	
	Textuurklasse: L(zandleem), A(leem), E(klei), U(zware klei), G(stenige gronden)		Textuurklasse: Z(zand), S(lemig zand), P(licht zandleem)	
	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)
.a.	>125	>125	>120	>125
.b.	>125	>125	90-120	>125
.c.	>80	>125	60-90	>125
.d.	50-80	>125	40-60	>125
.e.	20-50	>80	20-40	>100
.f.	0-20	40-80	0-20	50-100
.g.	0	<40	0	<50
.h.	20-50	>125	0-20	>125
.i.	0-20	>125	0-20	>125
.A.	Van 50 tot >125	>125	Van 40 tot >120	>125
.B.	>125	>125	Van 90 tot >120	>125
.D.	Van 50 tot >80	>125	40-90	>125
.F.	0-50	Van 40 tot >80	0-40	Van 50 tot >100
.G.	0-50	Van 40 tot >125	0-40	Van 50 tot >125
.H.	0-50	Van <40 tot >125	0-40	Van <50 tot >125
.I.	0-50	>125	0-40	>125

De bodemkaart van Vlaanderen ([Verkenner \(vlaanderen.be\)](http://Verkenner.vlaanderen.be)) geeft op elke locatie het bodemtype weer met hierin: de textuurklasse, de drainageklasse en de profielontwikkeling. Hier zijn enkel de eerste twee belangrijk. Eerst bepaalt men of de bodem een zware of lichte textuurklasse heeft. Vervolgens kan men aan de hand van de drainageklasse bepalen hoe diep het grondwater zich onder het maaiveld bevindt.

2.2. Data

Om de vergelijking te maken met het oppervlaktepeil hanteren we voor het kanaal het streefpeil, +2,13 mNAP of +4,60 mTAW. Voor de Moervaart doen we beroep op de peilmetingen van het waterinfo.be (Figuur 1).

Punten 72674010 en 76287010 liggen op de Moervaart en worden aangewend voor de analyse, beide zijn hoogfrequente meetreeksen die het waterpeil om de 15 minuten meten. Deze hoogfrequente meetreeksen zullen ons een gedetailleerd inzicht geven in het drainerend karakter van de rivier. Echter, de twee meetposten liggen ver uiteen. Om een idee te krijgen van het gedrag in de zone tussenin wordt een interpolatie uitgevoerd van het gemiddeld zomer- en winterpeil.



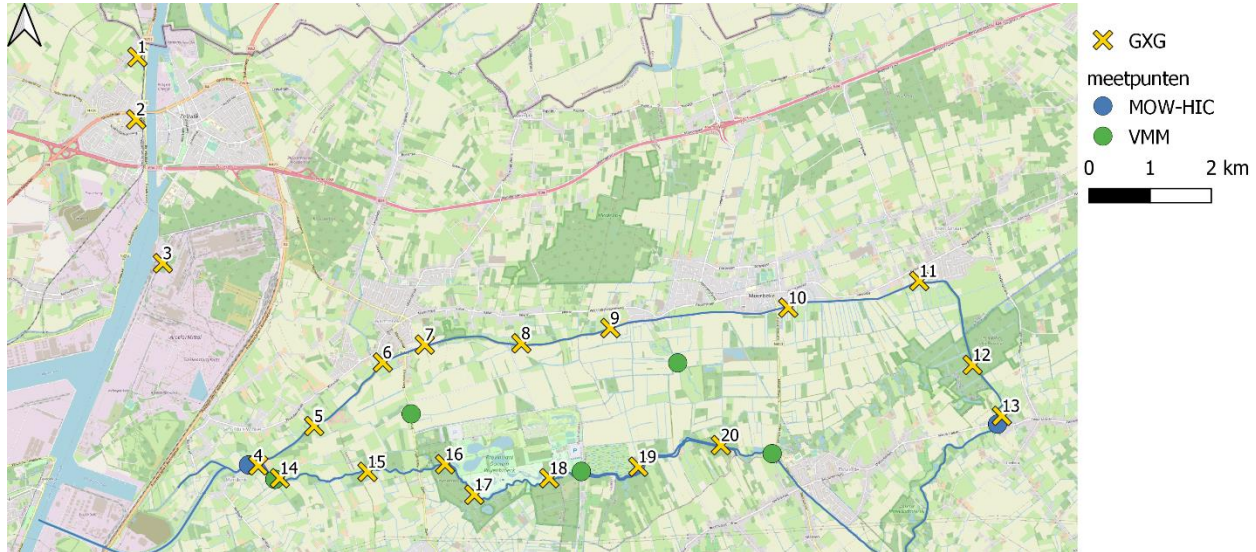
● MOW-HIC ● VMM

Figuur 1: Overzicht meetpunten waterpeil nabij de Moervaart. De ID's op de kaart komen overeen met de timeseries ID (ts_id)

2.3. Analyse

Om de analyse uit te voeren, berekenen we eerst de GHG en GLG op enkele locaties langs het kanaal. Gezien dit een zone is met veel industrie, zijn er maar beperkte locaties dichtbij het kanaal waar het drainagetype gekend is. Punten 1-3 in Tabel 2 zijn locaties langs het kanaal waarop GXG's berekend zijn, de ligging staat aangeduid op Figuur 2. Vlakbij de Nederlandse grens is het kanaal nog infiltrerend,

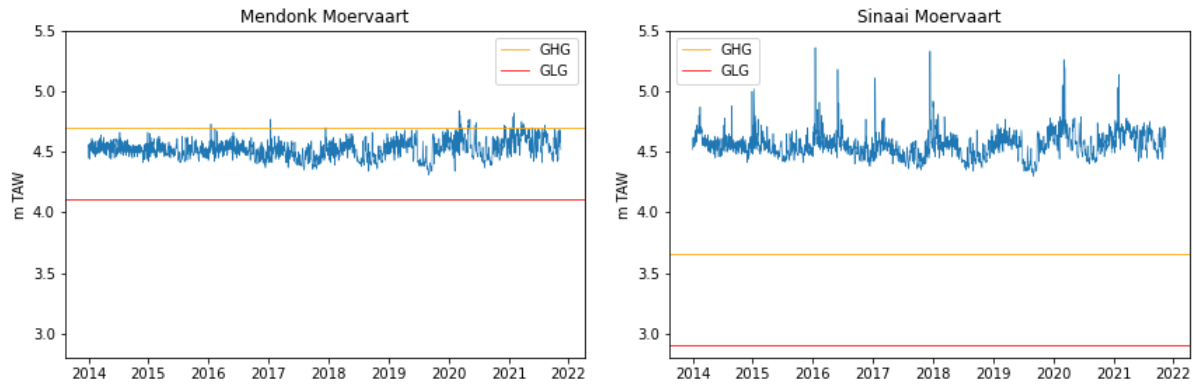
maar op de overige locaties ligt het grondwaterpeil hoger dan het streefpeil dus werkt het kanaal drainerend.



Figuur 2: Locaties GXG-berekeningen

Op de Moervaart hebben we twee meetposten waar het peil gemonitord wordt: in Mendonk en Sinaai (locaties 72674010 en 76287010 op Figuur 1). Op Figuur 3 wordt het verloop van het oppervlaktepeil vergeleken met de GHG en GLG. In Mendonk bevindt het oppervlaktepeil zich het volledige jaar boven de GLG maar (op een paar uitzonderingen na) onder de GHG. Dit wil zeggen dat de rivier infiltrerend werkt tijdens de zomer, wanneer we lage grondwaterstanden observeren, en drainerend tijdens de winter. In Mendonk heeft de vaart dus een gemengd karakter. Ter hoogte van Sinaai ligt dit anders: hier ligt het oppervlaktepeil ruimschoots boven de grondwaterstanden, we hebben dus een steeds infiltrerende situatie, ongeacht de seizoenen.

Om een idee te krijgen van de situatie tussen Sinaai en Mendonk, interpoleerden we het oppervlaktepeil en pasten we vervolgens dezelfde methode toe als voor het kanaal. Voor de twee meetstations werd het gemiddeld zomer- en winterpeil berekend, hiervoor werd data van de laatste 10 jaar gebruikt. Het zomerpeil wordt berekend door het gemiddelde te nemen van april tot september, het winterpeil van oktober tot maart. We vergelijken het zomerpeil met de GLG en het winterpeil met de GHG. Uit Tabel 2 blijkt dat in de zomer de vaart infiltreert (met uitzondering van 1 meetpunt). In de winter krijgen we terug een gemengd karakter. Dit wil zeggen dat in de zomermaanden – wanneer we verzilting observeren op de vaart (Vanhooren *et. al*, 2021) – dit zoutere water ook zal infiltreren in het grondwater. In de winter kan er ook infiltratie optreden maar dan is het oppervlaktewater zoet. Op de Zuidlede is dezelfde analyse uitgevoerd en daar observeren we ook een gemengd karakter in de winter en een infiltrerend karakter in de zomer. Ook hier zal de verdere verzilting van het kanaal – en bijgevolg de rivier – een effect hebben op het grondwater. Merk op dat het gemengd karakter in de winter minder uitgesproken is dan op de Moervaart. We observeren maar twee punten waarbij het kanaalwater lager ligt dan het grondwater.



Figuur 3: verloop oppervlaktepeil op de Moervaart

Tabel 2: grondwaterpeil t.o.v. oppervlaktepeil met hierbij ROOD: drainerend, BLAUW: infiltrerend. Punten 1-3 liggen langs het kanaal, punten 4-13 langsheen de Moervaart en punten 14-20 op de Zuidlede.

Punt	Grondwaterpeil		Oppervlaktepeil	
	GHG (mTAW)	GLG(mTAW)	winterpeil(mTAW)	zomerpeil(mTAW)
1	4,01	3,16	4,56	4,56
2	6,14	5,49	4,56	4,56
3	7,63	7,38	4,56	4,56
4	4,70	4,11	4,52	4,53
5	4,51	4,11	4,52	4,54
6	5,05	4,25	4,52	4,54
7	4,66	3,86	4,53	4,55
8	4,01	3,41	4,53	4,55
9	4,74	3,89	4,53	4,56
10	5,28	4,63	4,53	4,57
11	4,58	3,93	4,54	4,58
12	4,18	3,33	4,54	4,59
13	3,66	2,91	4,54	4,59
14	4,78	3,98	4,52	4,50
15	4,50	4,10	4,55	4,51
16	4,28	3,43	4,57	4,52
17	4,42	3,42	4,58	4,53
18	4,66	3,86	4,60	4,54
19	4,25	3,45	4,61	4,55
20	3,89	3,09	4,61	4,55

2.4. Besluit Drainerend/Infiltrerend Karakter

Net nabij de Nederlandse grens is het Kanaal Gent-Terneuzen nog infiltrerend, maar direct stroomopwaarts werkt het quasi onmiddellijk drainerend. **De aanname dat KGT drainerend is in België en infiltrerend in Nederland, wordt bijgevolg bevestigd door deze verkennende studie.**

Op de zijlopen waarvan het kanaalwater effect ondervindt van het verziltende kanaalwater (Moervaart en Zuidlede), is de situatie minder rechtlijnig. Gezien de ruimtelijke analyse van zoutgehalte in de waterlopen toonde dat vooral de Moervaart en Zuidlede effect ondervinden van de verdere verzilting van het kanaalwater, werd de analyse naar het drainerend karakter enkel op deze waterlopen uitgevoerd. Op zowel de Moervaart als de Zuidlede observeren we dat de rivieren infiltreren tijdens de zomer maar eerder een gemengd karakter vertonen tijdens de winter. Tijdens diezelfde periode wordt de grootste mate van verzilting gemeten op deze rivieren. Concreet wil dit zeggen dat het zoute rivierwater dan de ondergrond zal indringen en ervoor zal zorgen dat het grondwater verzilt, **de verzilting van het kanaalwater zal dus een invloed uitoefenen op het grondwater nabij de Moervaart en Zuidlede.** Tijdens de winter werkt de Moervaart op sommige plaatsen drainerend en op andere infiltrerend, waar mogelijk zal dan het zoete water infiltreren in het grondwater.

3. Verzilting grondwater

3.1. Methodiek en achtergrond

In dit onderdeel verkennen we op analytische wijze of de verdere verzilting van het kanaalwater een significant effect kan hebben op de zoetwaterlenzen die gebruikt worden door de landbouw in Nederland. De aanpak wordt in twee facetten verdeeld.

Eerst gaan we na of een hoger chloridegehalte kan leiden tot het voorkomen van **dichtheidsstroming**. In het geval van infiltratie van zout kanaalwater boven zoet(er) grondwater ontstaat immers een instabiele situatie wegens het dichtheidsverschil. Als kenmerk voor het optreden van dichtheidsstroming geldt het getal van Rayleigh:

$$Ra = (\Delta\rho g k_i H)/(\rho v n D)$$

Met: $ki = (k v)/g$

En:

Ra	getal van Rayleigh [-]
ρ	gemiddelde dichtheid [kg/m ³]
$\Delta\rho$	verschil in dichtheid [kg/m ³]
G	zwaartekracht versnelling [m/s]
k_i	intrinsieke doorlatendheid [m ² /s]
k	doorlatendheid [m/s]
H	dikte doorlatend pakket [m]
v	kinematische viscositeit [m ² /s]
n	volumefractie vocht [-]
D	diffusie coëfficiënt [m ² /s]

Een grenswaarde van 40 wordt doorgaans gehanteerd als maat voor het voorkomen van dichtheidsstroming (Van der Molen, 1989). We berekenen het getal van Rayleigh voor verschillende chloridegehalten om een inschatting te maken vanaf wanneer dichtheidsverschijnselen zich voordoen. Vervolgens dient ook bepaald te worden of de uitwisseling ten gevolge van de dichtheidsstroming maatgevend is, naar de methode van Van der Molen (1989). Waarin geldt:

$$\Delta H = \frac{\Delta\rho}{\rho} * L$$

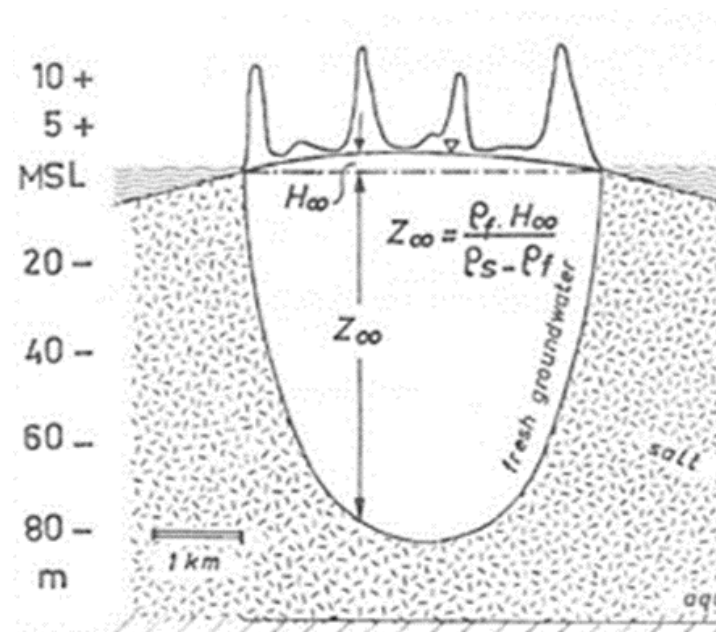
$$v = \frac{\Delta\rho}{\rho} * \frac{L}{c}$$

$$t = \frac{c}{\frac{\Delta\rho}{\rho}/n} \ln(L/L_0)$$

Met:

ΔH	stijghoogteverschil door dichtheid [m]
v	flux door dichtheid [m/d]
c	bodemweerstand [d]
t	tijd [d]
L	afstand [m]
L_0	initiële afstand [m]

In een volgend deel van de analyse kijken we naar de **geometrie van de zoet-zout verdeling** in het grondwater. De dikte van de zoetwaterlens die kan ontstaan in een **evenwichtssituatie** wordt bepaald door het zoutgehalte van de onderliggende laag en de opbolling. Doormiddel van de theorie van Badon-Ghijben (1988) en Herzberg (1901) wordt berekend op welke diepte de zoutwatergrens zich bevindt (Figuur 4).



Figuur 4: Zoetwaterlens op zoutwater naar het principe van Badon-Ghijben en Herzberg (Stuyfzand & Bruggeman, 1994)

Voor de drie transecten wordt dus berekend hoe diep het zoute water theoretisch voorkomt. We toetsen deze berekende dieptes daarna aan metingen van het zoutgehalte in Zeeland: hiervoor doen we beroep op FRESHEM (van Baaren *et al.*, 2018).

FRESHEM (*FRE*sh Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey) is een onderzoeksprogramma van Deltares, de Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO) en het Duits federaal instituut voor geowetenschappen (BGR) in opdracht van de provincie Zeeland. Het doel was het ontwikkelen van een aanpak voor het produceren van een driedimensionale chlorideverdeling van het grondwater. Het resultaat van dit project is een

dekkende kaart van Zeeland met de zoet-zout verdeling van het grondwater. De horizontale resolutie bedraagt 50x50m², de verticale 0,5 m.

De FRESHEM-studie maakt gebruik van *Airborne ElectroMagnetic induction* (AEM). Het principe hierachter is als volgt: een elektromagnetisch signaal wordt uitgezonden vanaf een vliegtuig of helikopter. Dit signaal reageert met de ondergrond waarvan het resulterende voltage geregistreerd wordt. Dit voltage vertelt ons iets over het chloridegehalte in de ondergrond; zoutwater is namelijk een betere geleider dan zoetwater. Om uit deze ruwe metingen een chloridekaart te bekomen, wordt echter een heel proces doorlopen. We lichten hiervan een klein stukje toe omdat die belangrijk is voor de interpretatie.

Het eindresultaat van dit project in een 3D-verdeling van het zoutgehalte of de conductiviteit/resistiviteit. Wat gemeten wordt met AEM is het voltage of de weerstand. Het omrekenen van de weerstand naar een resistiviteit verdeling, kan niet analytisch. Daarvoor moet de data geïnverteerd worden. Hierbij wordt gezocht naar een model dat de data voldoende kan verklaren, doorgaans door het minimaliseren van een objectieve functie:

$$\varphi(m) = \varphi_d(m) + \lambda\varphi_m(m)$$

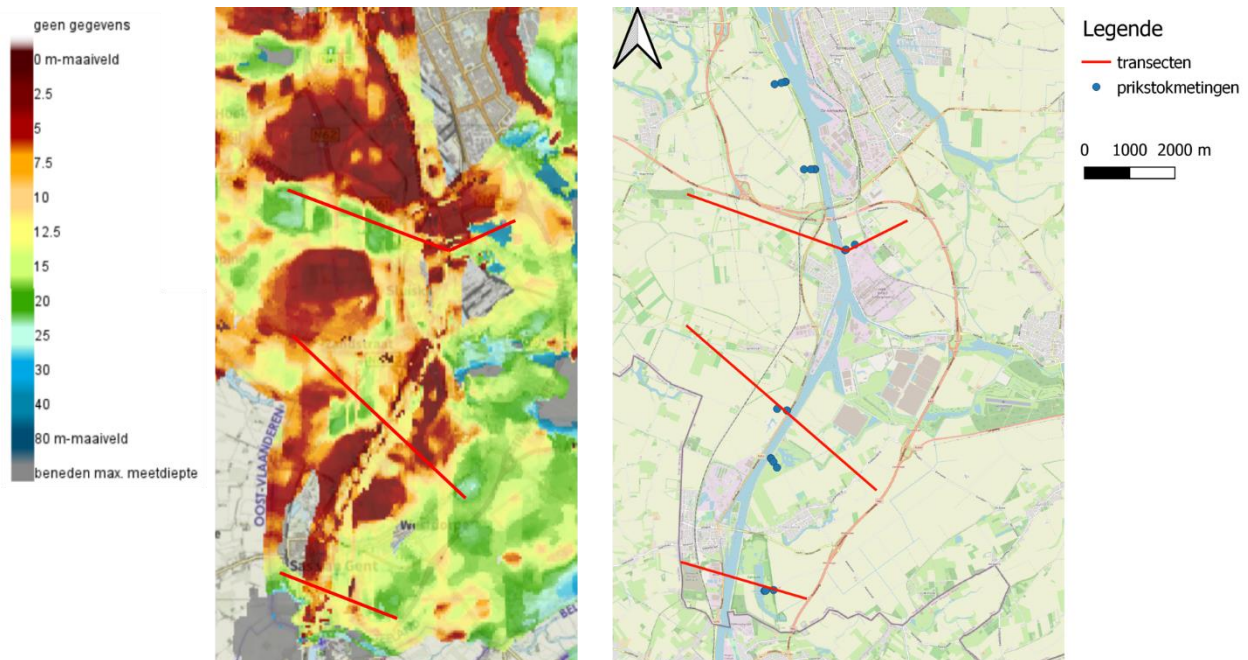
Waarbij de eerste term staat voor de data-misfit en de tweede voor de model-misfit. De regularisatie parameter λ , beschrijft een aangenomen karakteristiek van het model. Bij geofysische inversie wordt doorgaans een "*smoothing constraint*" gehanteerd (Tikhonov *et al.*, 1995). De naam duidt al op het feit dat de resultaten vloeiende overgangen hebben: scherpe transities in de resistiviteitsverdeling worden dan ook gedeeltelijk uitgemiddeld. Het zoet-zout grensvlak zal daardoor in een geleidelijke overgangszone gelokaliseerd zijn. Door die uitmiddeling kan ook de dikte en de locatie van de overgangszone niet altijd accuraat bekomen worden (Deleerneyder *et. al.*, 2021, Delsman *et. al.* 2019). Dergelijke modellen hebben dus een onbetrouwbare brakke zone, ook de grensvlakken die gevisualiseerd worden in de verkenner moeten **voorzichtig geïnterpreteerd** worden.

Verder moet nog benadrukt worden dat het hier niet louter over een *smoothing inversie* gaat maar over een *structurele inversie*. Dat wil zeggen dat er gegevens over de ondergrond zijn meegenomen in de berekening. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de (hydro)geologische eenheden. Langsheen de grenzen van deze eenheden, kunnen dus wel scherpe transities voorkomen die een artefact zijn van de harde afbakening van (hydro)geologische eenheden op de kaart.

3.2. Transecten

De kernvraag van deze studie is hoe verzilting van het kanaalwater het grondwater zal beïnvloeden, met name het effect op de zoetwaterlenzen omdat deze gebruikt worden door de landbouw. Bij het vastleggen van de transecten werd erop gelet dat ze in de buurt van zoetwaterlenzen liggen. In kader van het MER (Pfaff-Wagenaar & de Wit, 2015) werden prikstokmetingen uitgevoerd in de omgeving van het kanaal voor het kwantificeren van chloride op zes profielen langs het kanaal. De transecten vallen (gedeeltelijk) samen met drie van deze profielen.

De profielen staan aangeduid op Figuur 5. Het meest zuidelijke profiel ligt ter hoogte van Canisvliet en werd gekozen wegens het ecologisch belang van deze zone. De overige profielen werden gekozen waar zoetwaterlenzen liggen. Het middelste profiel ligt ter hoogte van Sluiskil en het bovenste profiel tussen Terneuzen en Sluiskil. Om verwarring te voorkomen, refereren we naar deze laatste als het transect "Terneuzen".



Figuur 5: ligging van de transecten. (LINKS): FRESHM, schaal duidt de diepte van het grensvlak 1000 mg Cl/L. bron: <https://kaarten.zeeland.nl/map/freshem> (RECHTS) ligging prikstokmetingen en transecten.

3.3. Hydrogeologie

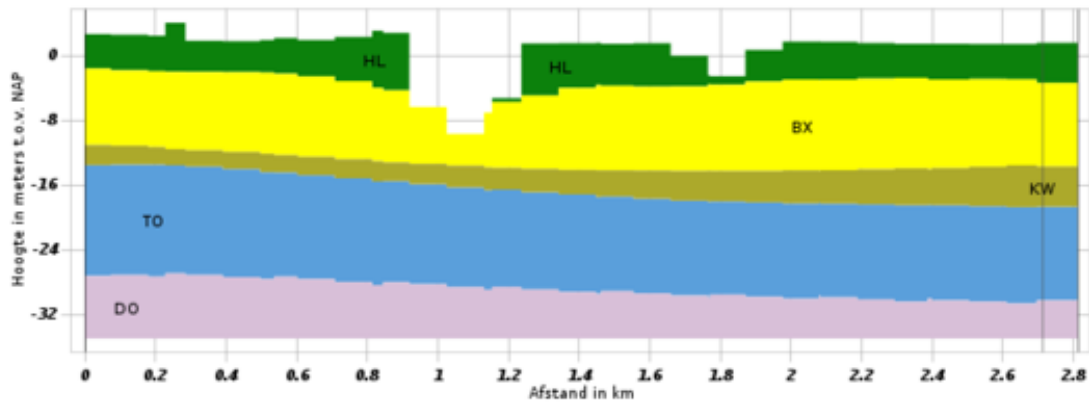
Figuur 6 toont de geologische eenheden langs bovenstaande transecten, de profielen zijn gemaakt in het Digitaal Geologisch Model van Nederland (DGM). Gezien hun nabijheid, is het niet onverwacht dat de ondergrond uit dezelfde geologische eenheden bestaat:

- Bovenop ligt een holocene deklaag met variabele dikte van 2 tot 15 m dik.
- Daaronder de formatie van Boxtel dat bestaat uit eolische zanden.
- Vervolgens hebben we de fluviatiele afzettingen van de formatie van Koewacht, die overeenkomt met de Vlaamse Vallei in België. Dat zijn overwegend zandige afzettingen, sporadisch afgewisseld met kleiige lagen.
- De formatie van Rupel komt enkel voor in het noorden van het studiegebied, waar het zich bevindt tussen de formaties van Koewacht en Tongeren. De formaties van Rupel en Tongeren zijn beide overwegend zandig, afgezet in marien milieu. In de formatie van Rupel treffen we vuursteenkeien en fosforietknollen aan, in de formatie van Tongeren komen kleiige lagen voor.

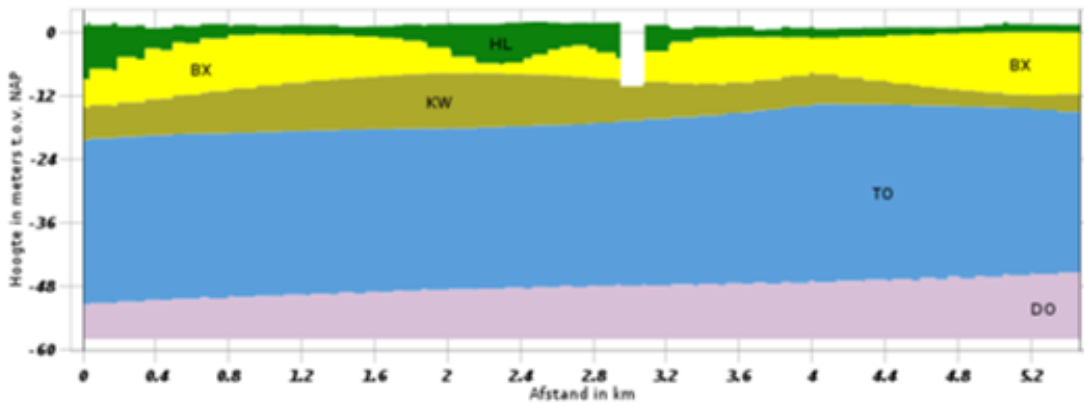
- Tot slot hebben we de formatie van Dongen dat discordant onder de formatie van Tongeren ligt en overwegend kleiig is. Het pakket kan 300 tot 500 meter dik zijn, waardoor de Formatie van Dongen dus als scheidende laag wordt beschouwd.

De bovenliggende formaties zijn bijgevolg allen overwegend zandig. De dikte van dit zandige pakket stijgt naar het noorden toe: ter hoogte van Canisvliet bedraagt het ongeveer 25 meter, terwijl het in Terneuzen al ruim 65 à 70 meter dik is (TNO-GDN). Gezien we hier met dezelfde afzettingen te maken hebben hanteren we dezelfde hydraulische doorlatendheid op de drie transecten: in REGIS II, v2.2 wordt die geschat tussen 1 en 5 m/d.

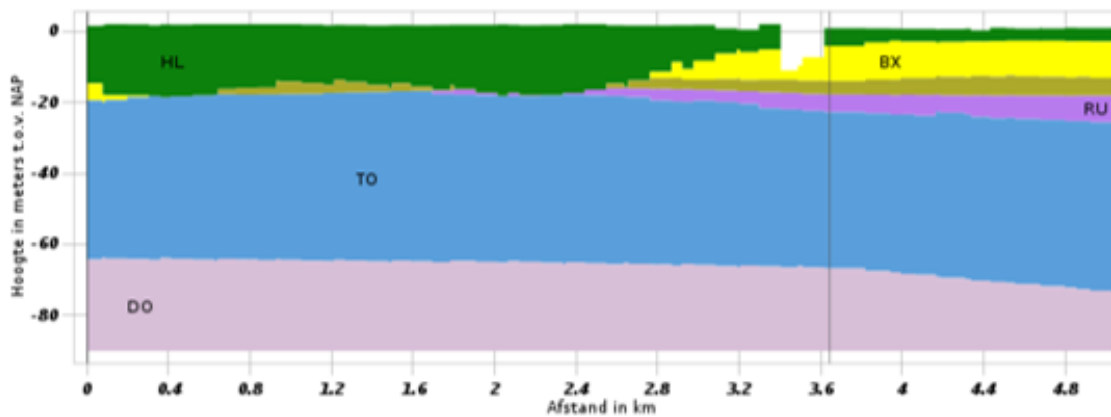
Canisvliet



Sluiskil



Terneuzen



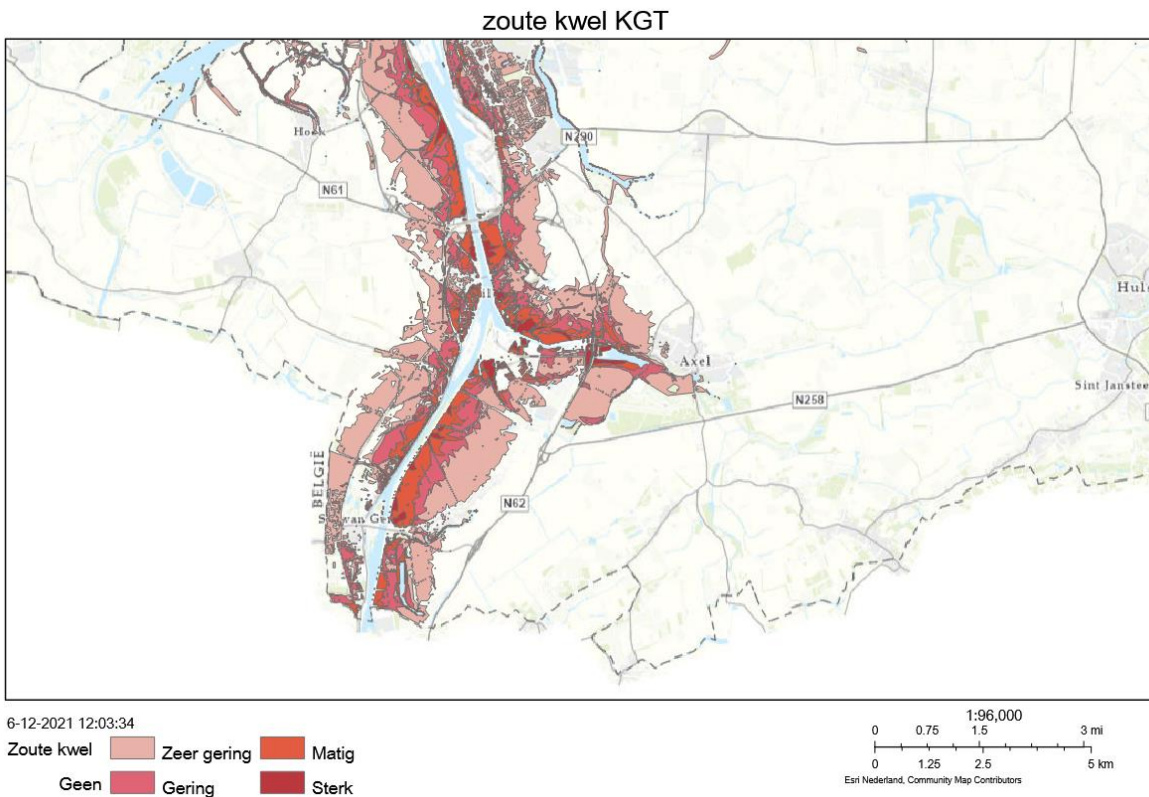
Figuur 6: Geologische doorsnede in het DGM-model langs de drie transecten. HL: Holocene afzettingen, BX: fm. van Boxtel, KW: fm. van Koewacht, RU: fm. van Rupel, TO: fm. van Tongeren, DO: fm. van Dongen. Locatie van de transecten staat weergegeven op Figuur 5, de linkerkant van de profielen komt overeen met de oostkant van de transecten.

3.4. Analyse

3.4.1. Bodemweerstand kanaal

Bij de beoordeling van het aspect grondwater is de omvang van infiltratie uit het kanaal naar de ondergrond van groot belang. In het MER (Pfaff-Wagenaar & de Wit, 2015) werd dit onderkend en is tevens geadviseerd om peilbuizen te plaatsen om hier meer inzicht in te krijgen. De aanwezige peilbuizen die beschikbaar zijn in het DINO-loket zijn echter te beperkt om dit accuraat te kunnen bepalen: de aanwezige peilbuizen liggen allen op een aanzienlijk grote afstand van het kanaal.

In het MER wordt uitgegaan van een bodemweerstand van 50 dagen. Dit is voornamelijk gebaseerd op ervaringen uit de regio van uittreden grondwater in de zone langs het kanaal, en op basis van kalibratie van het grondwatermodel. Het grondwatermodel paste namelijk beter bij een weerstand van 50 dan 100 dagen. In de modellering worden drie peilbuizen genoemd die gebruikt zijn voor de kallibratie. Deze liggen allen op een afstand van ca. 500 tot 700 meter van het kanaal. De zone met matige (zoute) kwel reikt echter tot ca. 400 meter van het kanaal, de zone met geringe kwel tot 700 meter. Om de invloed van het kanaal te bepalen, liggen deze **peilbuizen dus op een te grote afstand**. Dit is des te meer het geval omdat het hier om polder met een artificieel beheerst polderpeil gaat.



Figuur 7: zoute kwel in de omgeving van Kanaal Gent Terneuzen. Bron: <https://scheldestromen.maps.arcgis.com>

Bovendien werd het model enkel stationair gekalibreerd waarbij het verschil in dynamiek tussen verschillende peilbuizen niet is meegenomen. Hierdoor ontstaat het risico dat een **onderschatting van de grondwateraanvulling gecompenseerd wordt door grotere infiltratie** vanuit het kanaal dan daadwerkelijk optreedt. Verder merken we ook op dat bij dergelijke kanalen, waar **constante infiltratie optreedt en er aanvoer is van slib**, infiltratieweerstanden van 1000 dagen niet ongebruikelijk zijn. Tot slot is hierbij ook geen rekening gehouden met de horizontale uittreding van het grondwater, dat door sloten langs het kanaal wordt afgevangen. Hierdoor zal er nauwelijks invloed zijn op de grondwatersituatie.

Om bovengenoemde redenen voeren we de analyse in voorliggende studie uit met meerdere bodemweerstand. Het is namelijk niet onrealistisch om aan te nemen dat de weerstand een stuk hoger is dan werd bepaald in het MER. We hanteren hier weerstanden van 50, 100 en 150 dagen.

Om **een beter inzicht te krijgen op de huidige situatie van de bodemweerstand** is het dus aangeraden om enkele raaien van peilbuizen in een zone van 500 meter tot het kanaal te plaatsen en te monitoren voor minstens één jaar. Indien het kanaal verbreed en verdiept wordt zal de infiltratiecapaciteit echter veranderen. Het is alsnog interessant om dichtere peilbuizen te plaatsen zodat we al een zicht kunnen hebben op de grootteorde van de bodemweerstand.

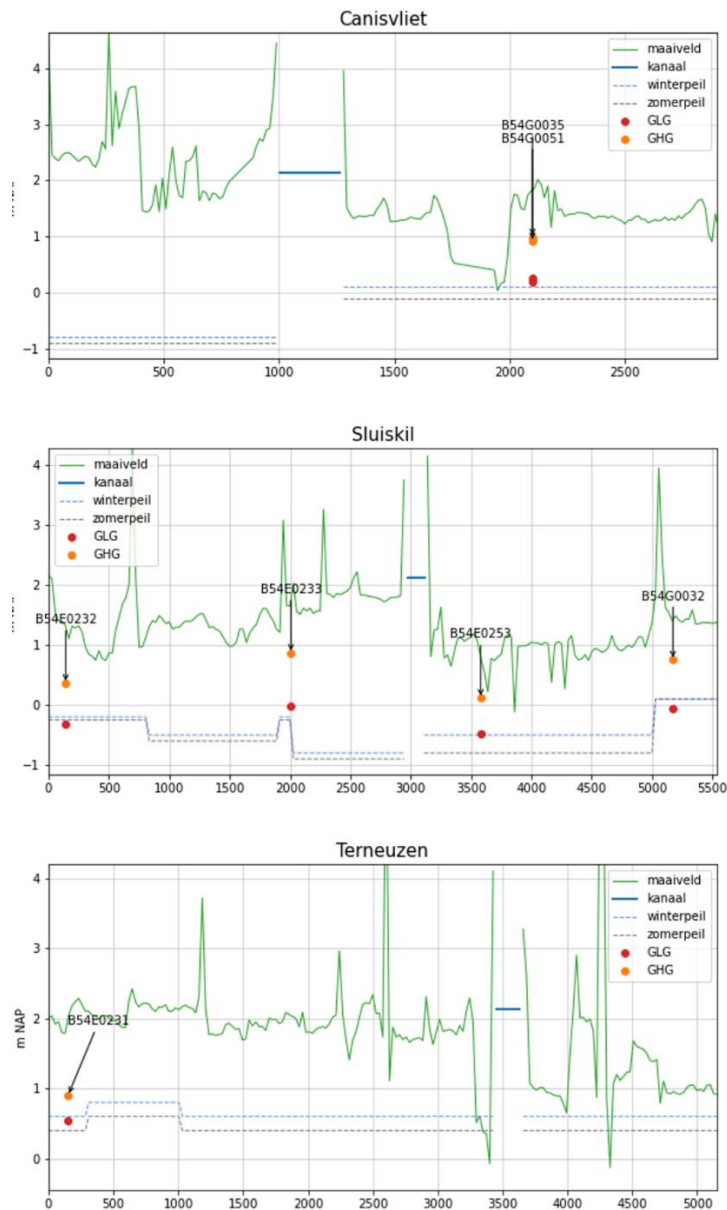
Ter illustratie voor de hydrologische situatie is voor de drie dwarsdoorsneden een profiel opgesteld met de maaiveldhoogte (AHN4), de gemiddelde hoogste grondwaterstand (GHG), de gemiddelde laagste grondwaterstand (GLG) in de peilbuizen, het kanaalpeil en polderpeil (Figuur 8). Op deze figuren is te zien dat de waargenomen grondwaterpeilen hoger liggen dan de polderpeilen. Omdat dit zowel het geval is voor peilbuizen op grote als korte afstand van het kanaal, is een directe relatie met het kanaal zeker niet evident. Het kanaalwater heeft een streefpeil van +2,13 m NAP, dat ruimschoot hoger ligt dan de polderpeilen en de grondwaterstanden. Er is dus sprake van een infiltratiesituatie vanuit het kanaal naar de ondergrond.

Voor de **maatgevende infiltratie** is uitgegaan van het streefpeil van het kanaal en – waar mogelijk – de in de peilbuis waargenomen GLG (zomersituatie). Het Terneuzen-transect heeft slechts 1 peilbuis dat op ruim 3 km van het kanaal ligt: hier wordt het polderpeil gehanteerd. Gelijkaardige resultaten zijn bekomen voor de drie transecten (Tabel 3). Bij een infiltratieweerstand van 50 dagen bedraagt de snelheid ongeveer 0,04 m/d. Als de weerstand toeneemt, daalt de snelheid. Dat is ook het geval in de wintersituatie wanneer er hogere grondwaterstanden zijn.

Tabel 3: infiltratiesnelheid langs de transecten op KGT

Infiltratieweerstand:	50 d	100 d	150 d
Locatie	Infiltratiesnelheid (m/d)		
Canisvliet	0,0396	0,0195	0,0132
Sluiskil	0,0428	0,0214	0,0143
Terneuzen	0,0418	0,0209	0,0139

De breedte van het kanaal ter hoogte van de transecten ligt tussen 160 en 280 meter. De grootste variatie observeren we ter hoogte van Canisvliet. De overige transecten bevinden zich qua breedte tussenin deze extremen. Bij een weerstand van 50 dagen en een infiltratiesnelheid van 0,04 m/d stroomt er in de dwarsdoorsnede dus 3,2 tot 3,5 m²/d. Binnen deze verkenning gaan we ervan uit dat de helft naar de oost- en de helft naar de westoever stroomt. Echter in Canisvliet en Sluiskil ligt het polderpeil op de westeroever lager, in werkelijkheid zal er dus iets meer water naar het westen stromen.



Figuur 8: hoogteprofielen van de drie transecten, de locatie van de peilbuizen is aangeduid in Figuur 5. De linkerkant van de profielen komen overeen met het Westen, de rechterkant met het Oosten.

Om een inschatting te maken over de verblijftijd van het water vanuit het kanaal, moeten we de dikte van het watervoerend pakket kennen; alsook de afstand waarop de berekening gemaakt moet worden. Bij Canisvliet nemen we de afstand van de kreek tot het kanaal. Bij de overige transecten de afstand tot de dichtstbijzijnde zoetwaterbel (Figuur 5). De dikte van het watervoerend pakket wordt afgeleid uit het geologisch model (Figuur 6). We werken met een bergingscoëfficiënt van 0,2 en een weerstand van 50 dagen. De gehanteerde waarden en resultaten staan in Tabel 4. In Canisvliet hebben we een verblijftijd van 1 à 2 jaar, deze neemt sterk toe naar het Noorden voornamelijk ten gevolge van de dikte van het watervoerend pakket. De afstand tot de waterloop is uiteraard ook belangrijk, maar minder bepalend dan de dikte. Bij een hogere weerstand neemt de verblijftijd toe. Met een weerstand van 500 dagen – die als meer waarschijnlijk aanzien wordt – ligt de verblijftijd met een factor 10 hoger, wat wil zeggen dat dit in Terneuzen kan oplopen tot maar liefst 100 jaar.

Tabel 4: verblijftijd grondwater langs de transecten.

Transect	Dikte watervoerend pakket (m)	Afstand tot kanaal (m)	Verblijftijd (j)
Canisvliet	25	400	1-2
Sluiskil	50	500	2-4
Terneuzen	65	900	5-10

3.4.2. Dichtheidsstroming

De berekeningen in bovenstaand onderdeel houden nog geen rekening met dichtheidseffecten. Om te evalueren of er significante dichtheidseffecten voorkomen, doen we beroep op het getal van Rayleigh (Ra). Hier wordt het verband gesteld tussen twee watermassa's met verschillende dichtheden. Als Ra groter is dan 40, kunnen we aannemen dat dichtheidsstroming voorkomt. De berekening wordt gedaan voor het huidig kanaalwater: 2 000 mg/L en het toekomstig kanaalwater 5 000 mg/L.

Eerst dienen we de dichtheid van deze zoute(re) waters te berekenen. Dit gebeurt aan de hand van het *Residue on Evaporation* (RE):

$$RE = 1,805 Cl^- + 30$$

$$\rho = 1 + 8,05 \cdot 10^{-7} RE - 6,5 \cdot 10^{-6} (t - 4 + 2,2 \cdot 10^{-4} RE)^2$$

Met:

ρ	gemiddelde dichtheid [kg/L]
t	temperatuur [°C]
Cl ⁻	chloridegehalte [mg/L]
RE	residue on evaporation [mg/kg]

Voor bovengenoemde concentraties (2000, 5000 mg/L) met een temperatuur van 10°C, geeft ons dit een dichtheid van respectievelijk: 1003 mg/kg en 1006 mg/kg. De standaardwaarden die we aangenomen hebben voor de berekening van Rayleigh staan in Tabel 5. De dichtheden staan hierboven, terwijl de dikte van het watervoerend pakket afhankelijk is van het transect (Tabel 4).

Tabel 5: gehanteerde waarden Rayleigh

Eenheid	Parameter	waarde
g	Versnelling zwaartekracht	9,81 m/s
k	doorlatendheid	1 m/s
v	Kinematische viscositeit	$1,0 \cdot 10^{-6}$ m ² /s
N	Volumefractie vocht	0,2
D	Diffusiecoëfficiënt	$7,0 \cdot 10^{-7}$ m ² /s

De resultaten van deze berekening staan in Tabel 6. Zoals bij de verblijftijd voert de dikte van het doorlatend pakket een sterke invloed uit op het resultaat. Hoe hoger Ra, des te hoger het effect van dichtheidsstroming. Dit is dus opmerkelijk hoger in Terneuzen dan in Canisvliet. Toch, gezien ook de laagste waarden ruim boven de grenswaarde van 40 liggen, kunnen we stellen dat dichtheidsstroming overal voorkomt. Om te bepalen als dit ook een significant effect heeft, kijken we naar de uitwisselingstermijn: hier is terug de afstand tot het kanaal van belang en afhankelijk van het transect (Tabel 4). Uit Tabel 6 blijkt dat de uitwisseling door dichtheidsverschillen meerdere tientallen tot zelfs honderden jaren bedraagt. Bij een hoger zoutgehalte verloopt de dichtheidsstroming sneller dan bij een laag gehalte. Ook hier zien we opnieuw het effect van de dikte van het watervoerend pakket, met opmerkelijk langere verblijftijden in Terneuzen dan in Canisvliet. De dikte van het doorlatend pakket is belangrijker dan de afstand tot het kanaal. Tot slot is in Tabel 6 de verblijftijd van het stromend water meegenomen. **Hieruit is het proces van dichtheidsstroming duidelijk veel kleiner dan de stroming van het grondwater zelf.** Bij een hoge infiltratieweerstand zal het verschil tussen de processen echter kleiner worden.

Tabel 6: Getal van Rayleigh en de uitwisselingstermijn voor twee situaties op de verschillende transecten. De verblijftijd van het water wordt gegeven voor twee breedtes van het kanaal.

Locatie	Getal van Rayleigh [-]		Uitwisselingstermijn (jaar)		Verblijftijd (jaar)
	2000 mg Cl ⁻ /L	5000 mg Cl ⁻ /L	2000 mg Cl ⁻ /L	5000 mg Cl ⁻ /L	
Canisvliet	5 430	14 200	86	33	1-2
Sluiskil	1 009	28 300	178	68	2-4
Terneuzen	14 100	36 800	245	95	5-10

3.4.3. FRESHEM & Badon-Ghyben Hertzberg

Uit de FRESHEM-gegevens blijkt dat het grondwater direct onder het kanaal al verhoogde chloridegehalten heeft, ter hoogte van Canisvliet in de orde van 2000 à 3000 mg/L en op de noordelijke transecten >5000 mg/L. Wanneer het zoutgehalte in het kanaal toeneemt tot 5000 mg/L, zal dit zoutere water ook in de ondergrond infiltreren. Hieruit blijkt onmiddellijk al dat dit voor de Noordelijke transecten een verwaarloosbaar effect zal hebben gezien het grondwater hier al in deze grootteorde zit, we verwachten dus enkel effecten voor Canisvliet.

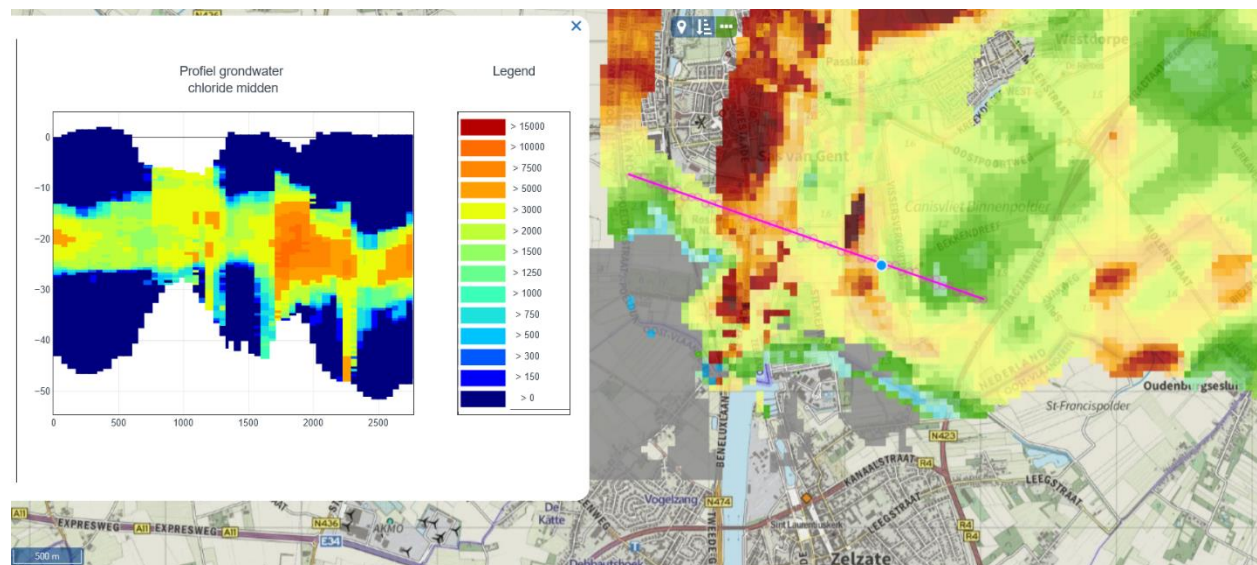
Uit het vorige hoofdstuk blijkt dat de infiltratieweerstand een belangrijke factor is voor het volume dat de ondergrond infiltreert. Hiermee wordt ook bepaald hoe snel het verhoogde zoutgehalte zal infiltreren. Bij een lage weerstand kan dit 1 à 2 jaar duren t.h.v. Canisvliet en t.h.v. Terneuzen tot 10 jaar. Bij een hogere weerstand neemt de verblijftijd sterk toe.

De variatie van het zoutgehalte in het kanaal wordt een belangrijke factor. Wanneer bijvoorbeeld het gehalte lager ligt door hogere afvoer tijdens de winter, zal door de lange verblijftijden in de bodem een menging van het zouter en zoeter water optreden. Het water dat kwelt zal bijgevolg een gemiddelde chloride gehalte hebben.

De dikte van de zoetwaterlens die kan ontstaan wordt bepaald door het zoutgehalte van de onderliggende laag en de opbolling. Middels de theorie van Badon-Ghijben Herzberg kan worden berekend dat bij een chloridengehalte van 3000 mg/L voor iedere 0,1 m opbolling, de lens tot ca. 25 meter diepte kan rijken. Bij een zoutgehalte van 5000 mg/L bedraagt dit ongeveer 15 meter.

Canisvliet

De zoetwaterlens t.h.v. Canisvliet (Figuur 9) rijken tot ongeveer 15 meter diepte en het zoutgehalte bedraagt tussen de 3000 à 5000 mg/L. We kunnen dus concluderen dat dit slechts gedeeltelijk veroorzaakt wordt door het zoutgehalte in de ondergrond. Waarschijnlijk wordt dit ook veroorzaakt doordat er in het watervoerende pakket een laterale stroming plaatsvindt die zoutwater aanvoert. Dit kan voorkomen wanneer we een anisotrope situatie hebben in de ondergrond, wat niet onverwacht is hier gezien de zandige lagen afgewisseld worden met klei en veenlaagjes.



Figuur 9: FRESHEM transect Canisvliet

De zoetwaterlens worden gevoed door neerslag. In het natuurgebied wordt neerslag zo veel mogelijk vastgehouden en zal deze waar mogelijk de bodem infiltreren. De oppervlakte van het gebied is 450 ha. Met een grondwateraanvulling van 200 mm/jaar bedraagt dit een aanvulling van 900 000 m³/jaar. Dit verandert uiteraard niet door toenemende chloridegehalten in het kanaal. Door de toevoer van hogere zoutgehalten vanuit het kanaal, zal het chloridegehalte in het grondwater op termijn iets toenemen.

De diepte van de zoetwaterlens wordt ook beïnvloed door horizontale stroming in het watervoerend pakket, verder blijft de aanvoer van zoetwater door regenval constant. Hierdoor verwachten we dat de toename van het zoutgehalte in het kanaal een relatief **beperkte invloed zal hebben op de aanwezigheid van zoetwaterlenzen.**

In tegenstelling tot wat het hoogteprofiel ons doet vermoeden, is er langs het kanaal geen damwand aanwezig t.h.v. Canisvliet (Figuur 10). De weerstand tegen horizontale uittreding vanuit het kanaal is bijgevolg waarschijnlijk beperkt. Over het algemeen ligt evenwijdig langs het kanaal een sloot die kwel vanuit het kanaal opvangt: de zgn. kwelsloot. In Figuur 10 zijn de waterlopen met afvoerrichting weergegeven. Het water wordt direct oostelijk van het kanaal in een kwelsloot opgevangen en vervolgens in oostelijke richting afgevoerd.

Gezien de toename van het chloridegehalte in het kanaal, kunnen we constateren dat er een grote chloridebelasting is op Canisvliet. Zowel in omvang als reactietijd is dit een belangrijkere bron dan de toevoer van chloride via het grondwater. Dit valt echter buiten de scope van voorliggende verkennende grondwaterstudie.



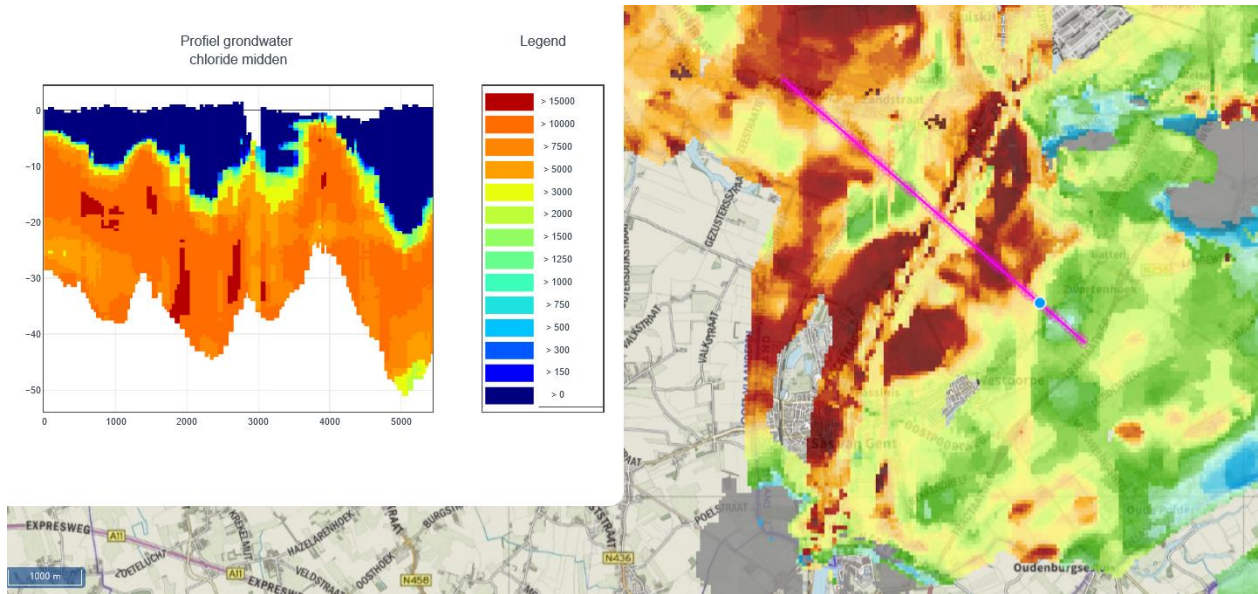
Figuur 10: Foto vanaf het kanaal ter hoogte van Canisvliet (bron: Cyclomedia)



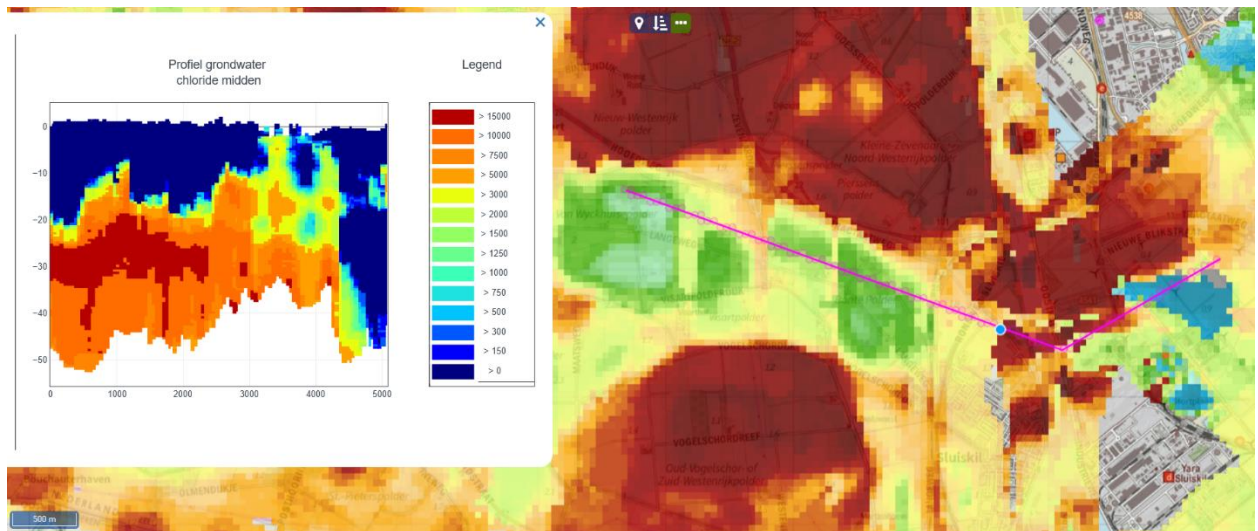
Figuur 11: Legger oppervlaktewater (bron: Interactieve kaarten WS Scheldestromen)

Noordelijke transecten

Ook in Sluiskil (Figuur 12) en Terneuzen (Figuur 13) zijn de zoetwaterlenzen ondieper dan wat berekend wordt aan de hand van Badon-Gijben Herzberg. Wat hier echter belangrijker is, zijn de reeds hoge chloridegehalten in de ondergrond: Waar we in Canisvliet waarden van ongeveer 2000 mg/L observeren, zien we hier chloridegehalten tot wel 7000 mg/L. Dit is zogenaamd "oud" grondwater: de hoge chloriden dateren namelijk van de vorige transgressieperiode. Een verdere verzilting van het kanaal zal hier dan ook weinig effect hebben, gezien het chloor in de ondergrond zich al ruim boven de 5000 mg/L grens ligt.



Figuur 12: FRESHEM transect Sluiskil



Figuur 13: FRESHEM transect Terneuzen

3.5. Besluit Verzilting Grondwater

In voorliggende deelstudie, bekijken we welke invloed de verdere verzilting van het kanaal heeft op het de zoetwaterlenzen in de ondergrond. We verkennen dit op drie transecten: Als eerste hebben we Canisvliet gekozen wegens de hoge ecologische waarde; de overige 2 transecten zijn gekozen waar er zoetwaterbellen voorkomen gezien deze van belang zijn voor de landbouw.

De veruit belangrijkste factor in deze analyse is de bodemweerstand of infiltratiecapaciteit van het kanaal. Dit bepaalt namelijk hoe snel – en bijgevolg hoeveel – water er de ondergrond indringt. In het MER werd een waarde van 50 dagen bepaald, maar er zijn echter talrijke redenen om aan te nemen dat deze waarde te laag ligt: in de onderzochte situaties nabij het KGT met constante infiltratie en aanvoer van slib, is een capaciteit van eerder 1000 plausibel. Dit leidt tot een mogelijke overschatting van de verblijftijd van het water waardoor de processen mogelijks veel langer duren dan geanticipeerd.

Om te evalueren als dichtheidsstroming voorkomt, werd het getal van Rayleigh berekend voor verschillende scenario's: huidige toestand (2000 mg Cl⁻/L) en een extreme toekomstige toestand (5000 mg Cl⁻/L). Deze wezen uit dat er nu al dichtheidsstromingen komen langs de drie transecten. Echter, de uitwisselingstijd toont aan dat dit proces enkele tientallen tot zelfs honderden jaren kan duren. Het effect van de dichtheidsstroming is bijgevolg verwaarloosbaar in vergelijking met de grondwaterstroming, dat tussen 1 en 10 jaar ligt. **Als het chloridegehalte hoger komt te liggen dan 5000 mg/l verkrijgen we bijgevolg nog steeds geen aanzienlijke wijzigingen in de grondwaterstroming.**

Dit sluit echter niet uit dat er effecten zijn van de verzilting van het kanaal: de dichtheidsstroming is verwaarloosbaar, maar het zoute kanaalwater infiltreert in de ondergrond en wordt met de grondwaterstroming mee verplaatst. In Canisvliet zal dit leiden tot een verdere verzilting van het grondwater onder de kreek. De twee meer noordelijke transecten hebben reeds een hoog chloridegehalte in het grondwater; vermoedelijk een artefact van historische zoutwaterintrusies bij oude transgressies van de zee. Hier verwachten we geen bijkomende effecten: noch ten gevolge van de dichtheidsstroming, noch door infiltrerend kanaalwater. Enkel wanneer het chloridegehalte in het kanaal hoger komt te liggen dan het zoute grondwater (jaargemiddelde waarden boven 10 000 mg Cl⁻/L), zal dit leiden tot een verdere verzilting van het grondwater. Ongeacht de andere methode en aannames, bekomen we bijgevolg toch gelijkaardige resultaten als het MER: **de te verwachten verdere verzilting van het Kanaal gent-Terneuzen zal geen aanzienlijke invloed uitoefenen op de zoetwaterlenzen; en bijgevolg ook niet op de landbouw.**

Indien men later wenst over te gaan tot een meer gedetailleerd grondwateronderzoek, wordt er aangeraden om meer inzicht te krijgen in de werkelijke infiltratie vanuit het kanaal. Het kan interessant zijn om enkele raaien van peilbuizen nabij het kanaal te plaatsen, op bijvoorbeeld afstanden van 10m, 25m, 50m, 100m en 250m. Daarnaast wordt aanbevolen om de bodemweerstand van het kanaal te meten middels bijvoorbeeld infiltratieproeven. Gezien de bodemweerstand variaties kan vertonen langs de lengte van een waterloop, wordt dit best op een aantal locaties verspreid langs het kanaal uitgevoerd met Canisvliet en de sluis in Terneuzen als uitersten en drie locaties tussenin op gelijkmatige afstand.



Een accurate inschatting van de bodemweerstand zal bijdragen aan de accuraatheid van de grondwatermodellen.

A. Referentielijst

- Badon-Ghyben. W. (1988). Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 9, 8-22.
- Deleersnyder, W., Maveau, B., Hermans, T., Dudal, D. (2021). Inversion of electromagnetic induction data using a novel wavelet-based and scale-dependent regularization term. Geophysical Journal International, 226, 1715-1729.
- Delsman, J., van Baaren, E., Vermaas, T., Karaoulis, M., Bootsma, H., de Louw, P., ... Thofte, S. (2019). TOPSOIL Airborne EM kartering van zoet en zout grondwater in Vlaanderen (FRESHM Vlaanderen). Deltares, 144.
- Herzberg, A. (1901). Die Wasserverorgung einiger Nordseebder. Z. Gasbeleucht. Wasserversorg, 44, 815-819.
- <https://kaarten.zeeland.nl/map/freshem>, geraadpleegd op 04-11-2021.
- <https://scheldestromen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer>, geraadpleegd op 06-12-2021.
- Pfaff-Wagenaar, M., de Wit, L. (2015). Rapport Vlaams Nederlandse Scheldecommissie – deelrapport MER Water. Lieveense CSO, 137.
- Stuyfzand, P.J., Bruggeman, G. (1994). Analytical approximations for fresh water lenses in coastal dunes. Proceedings of the 13th salt-water intrusion meeting, Cagliari – Italy, 5-10 June 1994, 15-33.
- Tikhonov, A.N., Goncharsky, A.V., Stepanav, V., Yagola, A. G. (1995). Numerical methods for the solution of ill-posed problems.
- TNO-GDN (2021). Stratigrafische Nomenclator van Nederland, TNO – Geologische Dienst Nederland. Geraadpleegd op 25-11-2021 op <http://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator/>
- Van Baaren, E., Delsman, J., Karaoulis, M., Pauw, P., Vermaas, T., Bootsma, H. de Louw, P.,..., Meyer, U. (2018). FRESHM technical report. Deltares, 142.
- Van de Molen, W.H. (1989). Het zoute grondwater in West-Nederland: een gevolg van dichtheidsstromingen? H₂O (22), 11, 330-331.
- Van Ranst, E. & Sys, C. (2000). Eenduidige legende voor de digitale bodemkaart van Vlaanderen (schaal1:20000). Universiteit Gent.
- Vanhooren, L., Van de Moortel, I., Michielsen, S., Hyde, P. (2021). Nota ruimtelijke verdeling zoutgehalte, verkennende analyse van de ruimtelijke spreiding van chloride op het kanaal en de zijlopen.