

A helicopter is shown in flight against a sky filled with white and grey clouds. The sun is visible on the left side, creating a bright glow. The helicopter is pulling a large, dark metal frame structure that is suspended in the air by several cables. The structure appears to be a large-scale measurement or sampling device.

**TOPSOIL Airborne EM
kartering van zoet en zout
grondwater in Vlaanderen
(FRESHEM Vlaanderen)**



Deltares

TOPSOIL Airborne EM kartering van zoet en zout grondwater in Vlaanderen (FRESHM Vlaanderen)

Deelopdrachten 1 tot en met 3

Joost Delsman (Deltares)
Esther van Baaren (Deltares)
Tommer Vermaas (Deltares)
Marios Karaoulis (Deltares)
Huite Bootsma (Deltares)
Perry de Louw (Deltares)
Pieter Pauw (Deltares)
Gualbert Oude Essink (Deltares)
Willem Dabekaussen (TNO)
Marc Van Camp (Universiteit Gent)
Kristine Walraevens (Universiteit Gent)
Alexander Vandenbohede (De Watergroep)
Rasmus Teilmann (SkyTEM)
Sara Thofte (SkyTEM)



11200306-000

Titel

TOPSOIL Airborne EM kartering van zoet en zout grondwater in Vlaanderen (FRESHEM Vlaanderen)

OpdrachtgeverVlaamse Milieu
Maatschappij, BRUSSEL**Project**

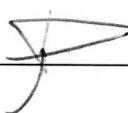


11200306-000

Kenmerk

11200306-000-BGS-0011

Pagina's

140

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	Maart. 2019	Joost Delsman		Gualbert Oude Essink		Marijn Kuijper	
				Alexander Vandenbohede (De Watergroep)			

Status

definitief

Inhoud

1	Introductie	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Studiegebied	2
1.3	Doelstelling	2
1.4	Definities zoet-brak-zout grondwater	2
1.5	Gehanteerde omrekeningen van elektrische geleidbaarheid, saliniteit, chloride	4
1.5.1	Elektrische geleidbaarheid en chloride	4
1.5.2	Saliniteit (Total Dissolved Solids, TDS)	5
1.6	Leeswijzer	5
2	Paleogeografische ontwikkeling en hydrografie projectgebied	7
2.1	Paleogeografische ontwikkeling	7
2.1.1	Inleiding	7
2.1.2	Na de laatste IJstijd	8
2.1.3	Naar een kustveenmoeras	8
2.1.4	Inpoldering	9
2.1.5	De verdeling van zoet-zout grondwater	10
2.1.6	Van inpoldering naar ontpoldering	12
2.2	Hydrografie (ontwatering en polders)	13
2.2.1	Het huidige afwateringssysteem	13
2.2.2	Zomer- en winterpeil	15
2.2.3	Enkele historische ontwikkelingen	16
3	Lithologisch model deelgebieden	19
3.1	Introductie	19
3.2	Deelgebied Westelijk kustgebied	20
3.2.1	Methodologie	20
3.2.2	Lagenopbouw	21
3.3	Centraal kustgebied: tussen Oostende en Zeebrugge	23
3.3.1	Methodologie	23
3.3.2	Lagenopbouw	23
3.4	Deelgebied Meetjesland	24
3.4.1	Lagenopbouw	24
3.5	Deelgebied Linker Scheldeoever	26
3.5.1	Methode	26
3.5.2	Lagenopbouw	26
3.6	Deelgebied Oostelijk kustgebied	27
3.7	3D voxelmodel lithologie	27
4	Database ground truth waarnemingen	29
4.1	Introductie	29
4.2	Chlorideconcentraties grondwater	29
4.3	Geofysische resistiviteit boorgatmetingen	29
4.4	Elektromagnetische inductie boorgatsonde	29
4.5	Vertical Electrical Soundings (VES)	30
4.5.1	Introductie	30
4.5.2	Methode	30

4.5.3	Problemen en limitaties bij de digitalisatie	31
4.6	SlimFlex metingen kustregio	31
4.7	Resultaten	32
5	Helikoptermetingen	35
5.1	Introductie	35
5.2	Meetsysteem en kalibratietests	35
5.3	Gerealiseerde vlieglijnen	36
5.4	Bewerking van ruwe meetgegevens	39
5.5	Power Line Noise Intensity (PLNI)	40
5.6	Beschikbare gegevens Oostelijk kustgebied	41
6	Inversie van helikoptermetingen	43
6.1	Introductie	43
6.2	Typen inversie	43
6.3	Spatially Constrained Inversion	44
6.4	Oostelijk kustgebied	46
6.5	Resultaten	46
7	Afleiden geleidbaarheid grondwater	47
7.1	Introductie	47
7.2	Theorie en terminologie	47
7.3	Eerste aanpak: FRESHEM Zeeland methode toegepast voor Vlaanderen	49
7.4	Tweede aanpak: Toepassing expertkennis en relatie AEM - grondmetingen	50
7.5	Tertiaire afzettingen	52
7.6	Resultaat	52
8	3D interpolatie van grondwatergeleidbaarheid	53
8.1	Inleiding	53
8.2	Gebruikte data	53
8.3	Resampling data op vlieglijnen	53
8.4	Modelbegrenzing	53
8.5	Interpolatie techniek	54
8.5.1	Indicator Kriging	54
8.5.2	Het zoekgebied	55
8.5.3	Het semivariogram model	55
8.5.4	Lokale anisotropie veld	57
8.6	Kruisvalidatie	60
9	Toetsing aan veldgegevens	63
9.1	Introductie	63
9.2	Methode	63
9.2.1	Analyses grondwater	63
9.2.2	Geofysische grondmetingen	64
9.3	Resultaten vergelijking	65
9.3.1	Analyses grondwater	65
9.3.2	Geofysische grondmetingen (uitgezonderd VES)	67
9.4	Omgaan met onzekerheden: een conservatieve en optimistische schatting van de hoeveelheid zoet grondwater	68
9.5	Validatie conservatieve en optimistische schatting zoetwatervoorraad	68

10 Resultaten	71
10.1 Introductie	71
10.2 Verticale profielen op de vlieglijnen	71
10.3 3D beeld saliniteit grondwater	72
10.4 Ruimtelijk beeld saliniteit op diepte intervallen	72
10.5 Diepteligging zoet – brak grensvlak	73
11 Vergelijking met verziltingskaart en op vier referentieprofielen	75
11.1 Introductie	75
11.2 Verschillen tussen beide verziltingskaarten	75
11.3 Deelgebied Westelijk kustgebied (ten westen van Oostende)	76
11.3.1 Het overdekt waddenlandschap tussen De Panne en de grens	76
11.3.2 Oude binnenduinen van Adinkerke (Cabourduinen)	77
11.3.3 De Moeren (ten noorden van het plateau van Izenberghe)	77
11.3.4 Tussen De Moeren en het kanaal van Lo ten zuiden van Veurne	78
11.3.5 Tussen Adinkerke en Koksijde	78
11.3.6 Ten oosten van het kanaal van Lo: de Avekapellekreek	78
11.3.7 Tussen Lo en Oudekapelle	80
11.3.8 De IJzerekreekrug	81
11.3.9 Ten noorden van Diksmuide:	82
11.3.10 Omgeving Nieuwpoort	82
11.3.11 Tussen Nieuwpoort en Oostende	83
11.3.12 Historische polders van Oostende	84
11.4 Deelgebied Centraal kustgebied (tussen Oostende en Zeebrugge)	85
11.4.1 Omgeving Klemskerke	85
11.4.2 Tussen De Haan, Wenduine en Blankenberge	86
11.4.3 Tussen Blankenberge en Zeebrugge	87
11.5 Deelgebied Meetjesland	87
11.5.1 Westelijk deel (ten westen van Watervliet)	87
11.5.2 Centraal deel (tussen Watervliet en Boekhoute)	88
11.5.3 Oostelijk deel (ten oosten van Boekhoute)	88
11.6 Deelgebied Linker Scheldeoever	89
11.6.1 Ten westen van Kieldrecht	89
11.6.2 Omgeving Kieldrecht	89
11.6.3 Ten oosten van Kieldrecht	90
11.7 Kwantitatieve vergelijking verziltingskaarten	91
11.8 Conclusies vergelijking verziltingskaarten	92
11.9 Vergelijking van de resultaten van de AEM survey met de 4 referentieprofielen	93
11.9.1 Referentieprofiel 1: De Panne – De Moeren	93
11.9.2 Referentieprofiel 2: Oostduinkerke	94
11.9.3 Referentieprofiel 3: Blankenberge	95
11.9.4 Referentieprofiel 4: Assenede	96
12 Discussie	99
12.1 Onzekerheden in de verschillende stappen in de methode	99
12.1.1 AEM survey	99
12.1.2 Inversie	99
12.1.3 Van bulk resistiviteit naar grondwatersaliniteit	100
12.1.4 Interpolatie tot 3D resultaat	100
12.2 Hoe goed is het resultaat?	100

13 Conclusies en aanbevelingen	103
13.1 Conclusies	103
13.2 Aanbevelingen	104
13.2.1 Toepassing van de FRESHEM resultaten	104
13.2.2 AEM survey	105
14 Referenties	107
Bijlage(n)	
A Gebruikte lagen en codering in lithologisch voxelmodel	A-1
A.1 Deelgebied Westelijk kustgebied:	A-1
A.2 Deelgebied Centraal kustgebied	A-1
A.3 Deelgebied Meetjesland	A-1
A.4 Deelgebied Linker Scheldeoever	A-2
A.5 Deelgebied Oostelijk kustgebied	A-2
B Onderzoek relatie EC_b - EC_w op basis in-situ metingen	B-1
B.1 Inleiding	B-1
B.2 Aanpak FRESHEM Zeeland	B-1
B.3 Beschikbare gegevens Vlaanderen	B-3
B.3.1 Lithologie	B-3
B.3.2 Gegevens relatie Rt en Rw	B-3
B.4 Waxman-Smits versus Patnode-Wyllie	B-4
B.5 Bepaling formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid Vlaanderen	B-5
B.5.1 Variant 1: alle data Universiteit Gent	B-5
B.5.2 Data Universiteit Gent, deeltjesgeleidbaarheid o.b.v. FRESHEM Zeeland	B-6
B.5.3 Data Universiteit Gent, uitgezonderd EC water < 2 mS/cm	B-7
B.5.4 Data Universiteit Gent, uitgezonderd EC water < 2 mS/cm, aangevuld met metingen Perry de Louw	B-8
B.5.5 Deeltjesgeleidbaarheid op basis FRESHEM Zeeland, gegevens aangevuld met data De Louw (2011)	B-8
B.5.6 Formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid Kustveen	B-9
B.5.7 Samenvatting varianten formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid	B-10
B.6 Vergelijking varianten met gemeten poriewater EC	B-10
C Grafieken en kaarten vergelijking verziltingsvlak	C-1
D Uitgevoerde extra grondmetingen	D-1
D.1 SlimFlex measurements	D-1
D.1.1 Introduction	D-1
D.1.2 Methodology	D-2
D.1.3 Results	D-4
D.2 Surface ERT lines and SIP	D-5

1 Introductie

1.1 Achtergrond

De Vlaamse Milieumaatschappij is bezorgd om de toestand van het kust- en poldersysteem langs de Vlaamse kust. Door klimaatverandering worden drogere zomers voorspeld en zal het neerslagoverschot minder zijn. De ondergrondse zoetwatervoorraad in het kustgebied komt hierdoor onder druk te staan. Tevens zal door zeespiegelstijging de omvang van de zoetwaterlenzen in de duinen afnemen, de zoutwaterintrusie toenemen en de zilte kweldruk in de polders vergroten. Dit alles beïnvloedt ondergrondse buffering van neerslagoverschot (Vandenbohede et al., 2008; 2009; 2010; Oude Essink et al., 2010; Faneca Sánchez et al., 2012; Pauw et al., 2012).

Netto zal er minder zoet grondwater beschikbaar zijn, maar de kwantificering hiervan is onzeker. Om de evolutie van de zoetwaterlenzen onder druk te kunnen volgen is een nieuwe kartering van de actuele verziltingsgraad van het freatisch grondwater in het gebied gewenst. Bovendien dient onderzocht te worden of lokale maatregelen de zoetwaterbeschikbaarheid kunnen vergroten om de effecten van klimaatveranderingen te compenseren. Naast bovenstaande klimaat adaptieve aanpak is er de wens voor een alternatief voor de diepe grondwaterwinningen in het kustgebied omdat deze winningen volgens de stroomgebiedsbeheerplannen in kwantitatieve zin niet duurzaam zijn. Door overexploitatie zijn zodanige verlagingskegels ontstaan dat er gezocht wordt naar alternatieve waterbronnen zoals freatische grondwaterwinningen.

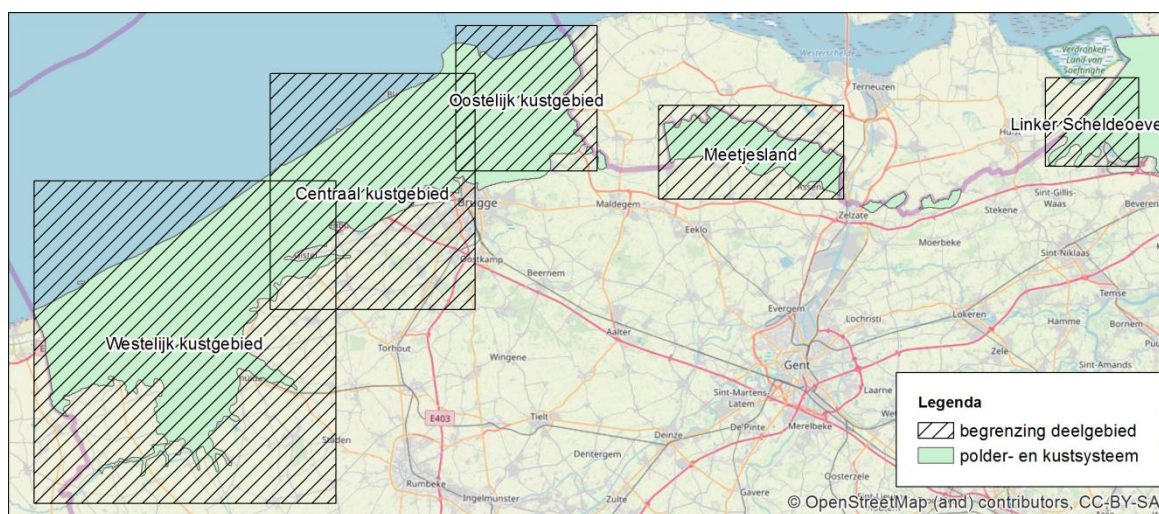
In het eerste deel van deze studie wordt de verdeling tussen zoet- en zout grondwater in kaart gebracht door middel van elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht. Elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht is de meest efficiënte methode om zoet en zout grondwater regionaal te karteren. Elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht in de Oostkust werd in opdracht van de VMM met succes toegepast (Schaars, 2014; Vandevelde et al., 2014; VMM, 2016), maar ook in Nederland (FRESHEM Zeeland, Van Baaren et al., 2018; Delsman et al., 2018), Duitsland en Denemarken zijn vergelijkbare surveys op grote schaal uitgevoerd. Het eerste deel heeft de naam FRESHEM Vlaanderen. In deel twee van deze studie onder de naam GO-FRESH Vlaanderen volgt een verkennend onderzoek naar potenties om de zoetwaterbeschikbaarheid in het freatisch systeem te verbeteren, leidend tot een kaart met weergave van deze potenties én een voorstel tot implementatie van maatregelen op één of meerdere projectlocaties. In deel twee worden de resultaten van het eerste deel gebruikt om tot betere resultaten te komen.

De gehele studie onder de naam 'TOPSOIL: FRESHEM for GO-FRESH Vlaanderen' wordt uitgevoerd in het kader van het Europese project TOPSOIL¹ in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). Voor het deelgebied Linkerscheldeoever werkt VMM samen met de MOW-afdeling Maritieme Toegang, het Havenbedrijf Antwerpen, Maatschappij Linkerscheldeoever en het Agentschap voor Natuur en Bos. In deze studie is daarnaast samengewerkt met TTW onderzoeksprogramma WaterNEXUS. Het onderzoeksprogramma WaterNEXUS (gesubsidieerd door NWO en Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, project 14298) heeft aanvullende grondmetingen en onderzoek gefinancierd en uitgevoerd in het studiegebied.

¹ <https://northsearegion.eu/topsoil/>

1.2 Studiegebied

Het studiegebied omvat de kustvlakte van de Franse tot de Nederlandse grens samen met het verzilt poldergebied van de provincies Oost-Vlaanderen en Antwerpen. Het elektromagnetisch onderzoek zal slechts in bepaalde gedeelten van het gehele studiegebied plaatsvinden. Een klein deel is al eerder in kaart gebracht en in sommige delen kan wegens een te dichte bebouwing niet gevlogen worden. Het studiegebied is opgedeeld in de deelgebieden Westelijk kustgebied, Centraal kustgebied, Oostelijk kustgebied (voor dit deelgebied is eerder een airborne survey uitgevoerd), Meetjesland en Linker Scheldeoever.



Figuur 1.1 Onderscheiden deelgebieden binnen het studiegebied.

De paleogeografie en hydrologie van het studiegebied wordt uitgebreid beschreven in Hoofdstuk 2.

1.3 Doelstelling

Het doel van de eerste drie deelopdrachten van het project TOPSOIL: FRESHM for GO-FRESH Vlaanderen is het realiseren van een drie-dimensionale elektrische geleidbaarheidsverdeling van het grondwater gebaseerd op airborne EM metingen in combinatie met a-priori data, geavanceerde modeltechnieken, kennis van het grondwatersysteem en de hydrogeologie. Deze gecombineerde aanpak is nodig voor het behalen van het gewenste eindresultaat.

In de vierde deelopdracht wordt advies gegeven over mogelijke pilotprojecten waar innovatieve maatregelen de zoetwatervoorziening in het freatisch grondwatersysteem kunnen verbeteren ten behoeve van landbouw.

In deze rapportage worden de aanpak en resultaten van de eerste drie deelopdrachten beschreven.

1.4 Definities zoet-brak-zout grondwater

Enkele gehanteerde grenzen van de zoet, brak en zout grondwater staan in Tabel 1.1 weergegeven. Dit zijn de geleidbaarheidsklassen volgens De Moor en De Breuck (1969), de classificatie van Stuyfzand (1986) voor drinkwater en de zoutschadedrempels volgens Maas en Hoffman (1977) voor landbouwgewassen. Voor meer informatie over deze zoutschadedrempels wordt verwezen naar Stuyt et al. (2016).

Tabel 1.1 Enkele zoet-brak-zout grenzen voor drinkwater en landbouw. Omrekeningen uitgevoerd met omrekeningen gepresenteerd in paragraaf 1.5.

Beschrijving	Chloride concentratie (mg/L)	Elektrische geleidbaarheid (25°C µS/cm)	Saliniteit (TDS) (mg/L)
Classificatie van De Moor en De Breuck (1969)			
Zeer zoet	< 75	< 225	< 180
Zoet	75 – 150	225 – 450	180 – 360
Matig zoet	150 – 300	450 – 900	360 – 720
Zwak zoet	300 – 600	900 – 1800	720 – 1450
Matig brak	600 – 1250	1800 – 3700	1450 – 2900
Brak	1250 – 2500	3700 – 7500	2900 – 5800
Zeer brak	2500 – 5500	7500 – 15000	5800 – 11600
Matig zout	5500 – 12000	15000 – 30000	11600 – 23200
Zout	> 12000	> 30000	> 23200
Classificatie van Stuyfzand (Stuyfzand, 1986)			
Zoet	< 150	< 450	< 360
Zoet-brak	150 – 300	450 – 900	360 – 710
Brak	300 – 1000	900 – 3000	710 – 2350
Brak – zout	1000 – 10000	3000 – 26000	2350 – 20250
zout	> 10000	> 26000	> 20250
Zoutschadedrempelwaarde landbouw (Maas en Hoffman, 1977)			
Gevoelige gewassen	300	900	710
Matig gevoelige gewassen	600	1800	1400
Matig tolerante gewassen	1200	3600	2800
Tolerante gewassen	2400	7000	5500
Referentieconcentraties			
Grens voor drinkwaterbereiding Vlaanderen ^a	250 ^a	2333 ^a	1820 ^a
Grens tussen zoet en brak grondwater zoals gehanteerd in de Provincie Zeeland, Nederland	1500	4450	3500
Zoet-zout grens 1.5 g/L TDS Vlaamse verziltingskaart	635	1920	1500

^a EC25 is hier niet afgeleid van de chloridenorm, maar een op zichzelf staande norm (2100 µS/cm EC20). Saliniteit is van EC25 afgeleid.

In deze rapportage wordt het zoutgehalte van grondwater – tenzij uitdrukkelijk anders vermeld – uitgedrukt in de elektrische geleidbaarheid bij 25 °C (EC25). Verder wordt in deze rapportage en in de opgeleverde producten de volgende indeling gehanteerd voor zoet, brak en zout grondwater (Tabel 1.2):

Tabel 1.2 In dit project gehanteerde grenzen tussen zoet, brak en zout.

Beschrijving	Elektrische geleidbaarheid (25°C µS/cm)	Saliniteit (TDS) (mg/L)	Chlorideconcentratie (mg/L)
Zoet	0 - 2000	0 - 1550	0 - 650
Brak	2000 - 25000	1550 - 19500	650 - 7500
Brak – Zout	> 25000	> 19500	> 9600

De zoet-brak grens is gebaseerd op de zoet-zout grens van 1500 mg/L TDS, zoals deze is gehanteerd in de huidige verziltingskaart (De Breuck et al, 1974; 1989) (maar zie Vandenbohede et al. (2015) voor een uitgebreide discussie van de betekenis van deze ‘grens’ in de verziltingskaart). De brak-zout grens is gebaseerd op de door Stuyfzand (1988) gehanteerde grens van zout water. De waarden zijn hier iets aangepast om – uitgedrukt in EC25 – tot afgeronde waarden te komen.

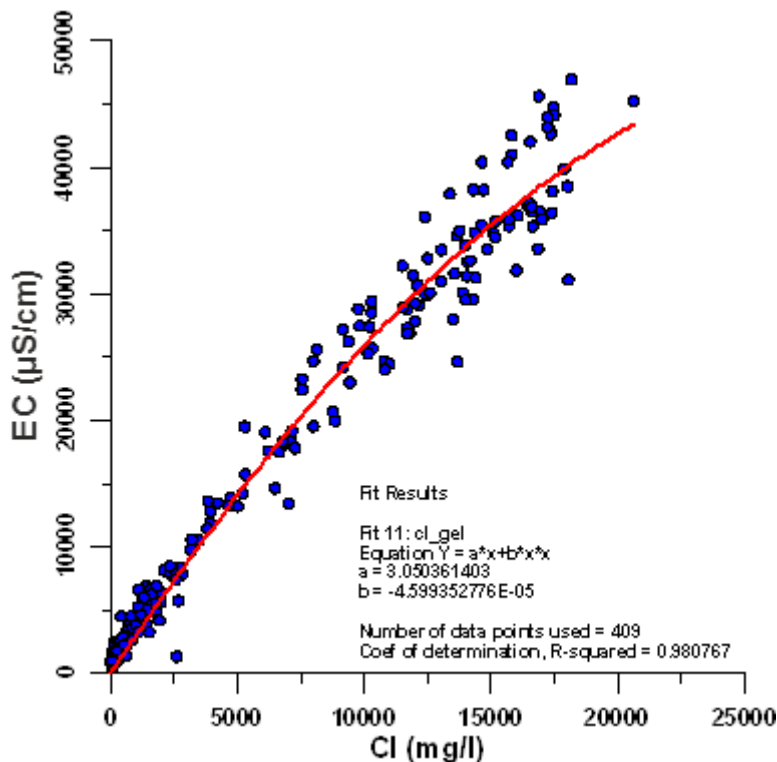
1.5 Gehanteerde omrekeningen van elektrische geleidbaarheid, saliniteit, chloride

1.5.1 Elektrische geleidbaarheid en chloride

Specifiek voor het Vlaamse kustgebied is door UGent – LTGH de volgende relatie afgeleid tussen elektrische geleidbaarheid (EC25, in µS/cm) en chloride (in mg/l).

$$EC_{25} = 3.05Cl - 4.60 \cdot 10^{-5} Cl^2 \tag{1.1}$$

Op basis van deze formule kan als vuistregel gesteld worden dat de geleidbaarheid bij 25°C in µS/cm ongeveer overeenkomt met driemaal het chloridegehalte in mg/l.



Figuur 1.2 Afgeleide relatie tussen elektrische geleidbaarheid (EC25, µS/cm) en chloride (mg/l)

1.5.2 Saliniteit (Total Dissolved Solids, TDS)

Saliniteit en elektrische geleidbaarheid zijn aan elkaar gerelateerd via de UNESCO 1980 equation of state (Fofonoff and Millard, 1983). Vaak is echter een lineaire relatie tussen poriewater geleidbaarheid (in mS/cm) en TDS (in g/L) afdoende (Vandenbohede et al., 2015):

$$TDS = \frac{f_{11}}{10} \cdot EC_w, \quad (1.2)$$

met f_{11} (met eenheden g Ω m/L), specifiek voor een grondwatertemperatuur van 11 °C, de gemiddelde temperatuur van het ondiepe grondwater in Vlaanderen. Lebbe en Pede (1986) stellen een gemiddelde waarde van 1 voor de factor f_{11} . Vandenbohede et al. (2015) geven waarden voor f_{11} die variëren tussen 0.9 en 1.4, met een gemiddelde van 1.07 gm/SL. Als directe omrekening tussen TDS en EC25 wordt binnen VMM daarnaast de volgende eenvoudige omrekening gebruikt gebaseerd op metingen in de polders en bovenstaande classificaties (tabel 1.1):

$$TDS = 0.76 \cdot EC_{25} \quad (1.3)$$

Geleidbaarheid wordt vaak uitgedrukt met als referentietemperatuur 25 °C. Geleidbaarheden bij een gegeven temperatuur t_0 kunnen als volgt worden omgerekend naar een referentietemperatuur t :

$$EC_t = \frac{EC_{t_0}}{1 + c(t_0 - t)}, \quad (1.4)$$

met c de temperatuurcoëfficiënt (met een waarde van 0.02 °C⁻¹).

1.6 Leeswijzer

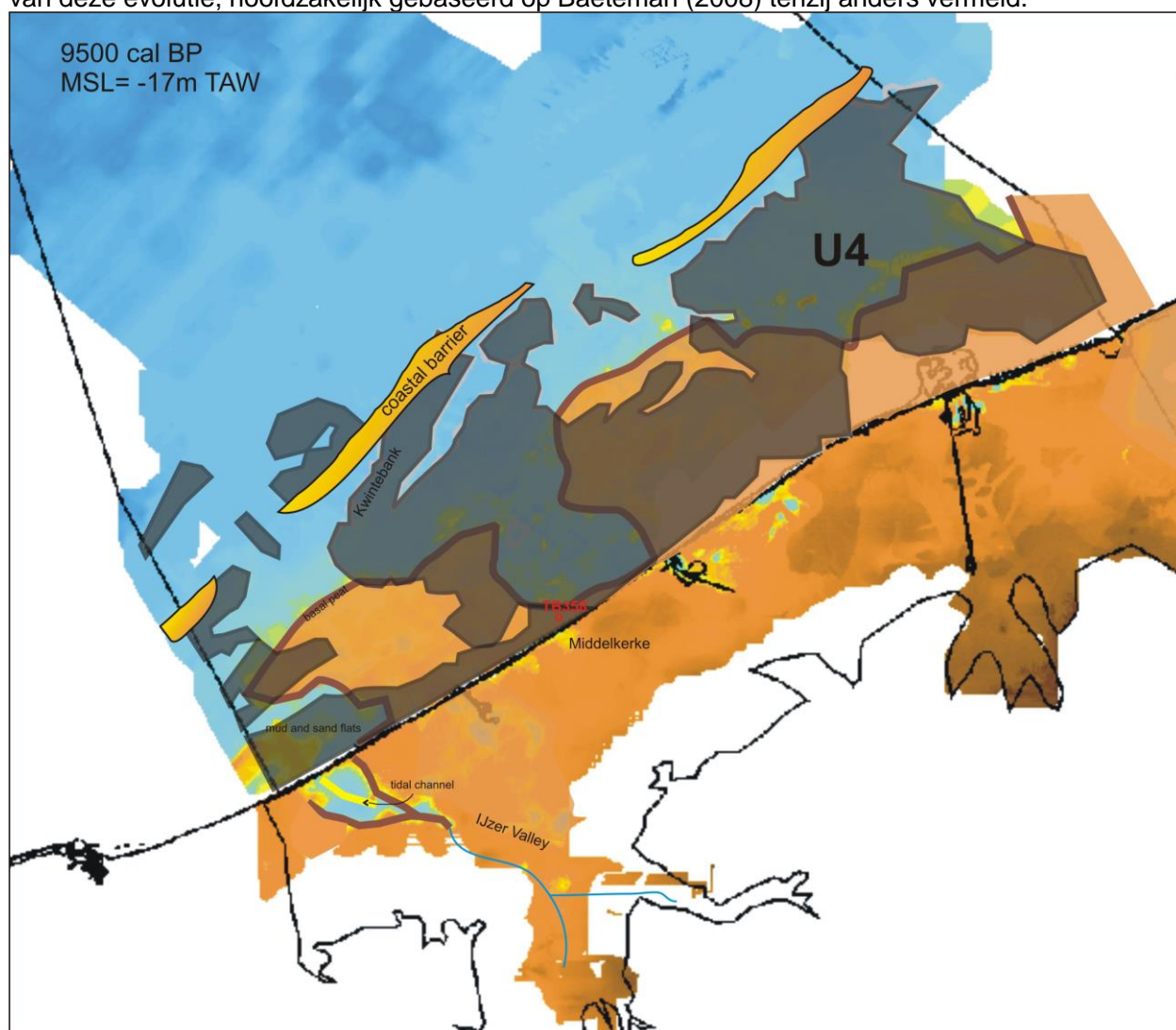
Deze rapportage is als volgt opgebouwd. Eerst wordt in Hoofdstuk 2 een uitgebreide beschrijving gegeven van paleogeografie en hydrografie van het studiegebied, aangezien deze een belangrijke rol spelen bij de interpretatie van het voorkomen van zoet en zout grondwater. In Hoofdstuk 3 wordt de totstandkoming beschreven van een nieuw lithologisch model van de verschillende deelgebieden. Hoofdstuk 4 beschrijft de verwerking van de verschillende beschikbare grondmetingen tot een bruikbare digitale database. In Hoofdstuk 5 wordt de uitgevoerde helikoptersurvey beschreven, een samenvatting van de eerder opgeleverde detailrapporten over de AEM survey (SkyTEM, 2017a, b). Hoofdstuk 6 beschrijft de inversie van de helikoptermetingen tot een beeld van de bulk resistiviteit van de ondergrond. Deze bulk resistiviteit wordt vervolgens met lithologische relaties vertaald in een inschatting van de grondwatersaliniteit langs de vlieglijnen (Hoofdstuk 7), en door middel van 3D interpolatie verwerkt tot een driedimensionaal beeld van zoet en zout grondwater (Hoofdstuk 8). In Hoofdstuk 9 wordt beschreven hoe dit driedimensionale beeld is vergeleken met de beschikbare grondmetingen. Hoofdstuk 10 beschrijft de verschillende producten die als resultaat worden opgeleverd. In Hoofdstuk 11 wordt het resultaat vergeleken met de huidige beschikbare kennis, voor wat betreft de huidige verziltingskaart, en een viertal referentieprofielen. Hoofdstuk 12 en 13 bevatten achtereenvolgens een discussie van de onzekerheden in het resultaat, en de conclusies en aanbevelingen.

2 Paleogeografische ontwikkeling en hydrografie projectgebied

2.1 Paleogeografische ontwikkeling

2.1.1 Inleiding

De Belgische kustvlakte heeft op korte termijn een ingrijpende evolutie doorgemaakt. Na de laatste IJstijd was de zeespiegelstijging de drijvende kracht die het gebied vorm gaf en een reeks kustmilieus creëerde zoals slikken en schorren en veenmoerassen. De inpoldering door de mens transformeerde het gebied tot het huidige polderlandschap en dit legde de verdeling van zoet en zout water, wat nu wordt gemeten, vast. Hieronder volgt een summier overzicht van deze evolutie, hoofdzakelijk gebaseerd op Baeteman (2008) tenzij anders vermeld.



Figuur 2.1 Paleogeografische reconstructie van de kustvlakte, ongeveer 9500 jaar geleden (Mathys (2009) in combinatie met Baeteman (2005)). Achter een kustbarrière heeft er zich een slikken- en schorregebied (grijze zones) gevormd. De zee heeft toegang tot de huidige kustvlakte via de paleovallei van de IJzer. De zeespiegel bevond zich toen op ongeveer -17 m TAW.

2.1.2 Na de laatste IJstijd

Tijdens de laatste IJstijd daalde het zeeniveau tot 110 à 130 m onder het huidig peil waardoor de Noordzee droog kwam te liggen. De huidige westelijke kustvlakte bestond toen uit een fluviatiel landschap, gekenmerkt door de paleovallei van de IJzer en haar bijrivieren. De huidige oostelijke kustvlakte was gekenmerkt door het voorkomen van hoger gelegen dekzandruggen.

De IJstijd eindigde ongeveer 12 500 jaar geleden waardoor het zeeniveau uiteraard steeg en de zee terug bezit nam van het Noordzeegebied. Rond 12 000 jaar geleden was de zee al 80 m gestegen. In het zuidelijk deel van de Noordzee ontstond een microtidaal (getijdenamplitude minder dan 2 m) slikken- en schorregebied doorsneden door krekken, vergelijkbaar met het huidige Duitse Noordzeegebied. Dit gebied werd zeewaarts beschermd door een kustbarrière. De zee bereikte het gebied van de huidige westelijke kustvlakte rond 9500 jaar geleden (Figuur 2.1). Aanvankelijk was dit via het Nauw van Calais maar rond 9000 jaar geleden ook via de Noordzee. Getuige hiervan is het zogenaamde basisveen. Dit veen werd gevormd in zoetwatermoerassen als gevolg van een stijgende grondwatertafel. Rond 8700 jaar geleden bereikte de zee de huidige middenkust, met name nabij Middelkerke zijn hier aanwijzingen voor.

Initieel steeg de zeespiegel vrij snel, i.e. 0.7 cm per jaar, wat leidde tot een relatief snelle verdere landwaartse opschuiving van het getijdengebied. Het leidde ook tot de afzetting van een relatief dik pakket (ongeveer 10 m) sediment. Circa 7500 à 7000 jaar geleden trad er een vermindering op van de snelheid waarmee de zeespiegel steeg. De zeespiegelstijging bedroeg vanaf dan 0.25 tot 0.4 cm per jaar. Dit zorgde voor een stabilisatie van de kustbarrière en het opslibben van het slikken- en schorregebied. Er ontstond een kustveenmoeras. En waar zout water het slikken- en schorregebied domineerde, is de rol overgenomen door zoet water in het veenmoeras waardoor er lokaal dunne zoetwaterlenzen konden worden gevormd.

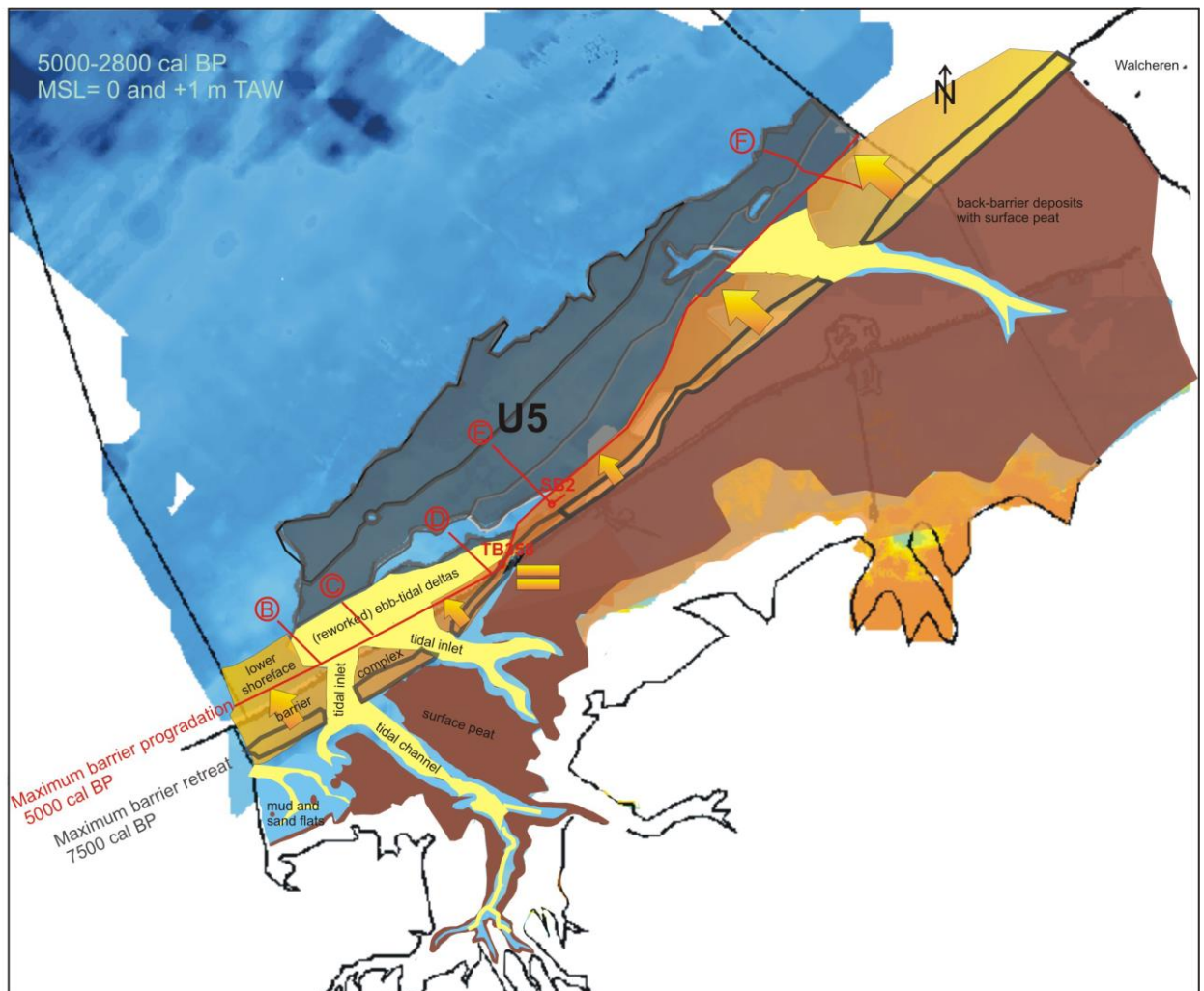
Het bleef echter een dynamisch landschap. De zeespiegel bleef immers stijgen en in de nabijheid van geulen werd er zand of klei afgezet. Ook konden geulen zich blijven verplaatsen waardoor een veengebied kon evolueren in een slikken- en schorregebied of vice versa. Sedimenten daterend uit 7500 – 5500 jaar geleden bestaan zodoende uit een afwisseling van slikken- en schorrensedimenten en veen.

2.1.3 Naar een kustveenmoeras

Een tweede afname van de zeespiegelsnelheid deed zich voor rond 5500 à 5000 jaar geleden. De zeespiegelstijging bedroeg vanaf toen 0.07 tot 0.1 cm per jaar. Dit zorgde ervoor dat veenmoerassen zich gevoelig konden uitbreiden. Rond 4800 jaar geleden was zo goed als de volledige kustvlakte omgevormd tot een moeras (Figuur 2.2). Getuige hiervan is een relatief dikke veenlaag (tot maximaal enkele meters die nu nog wordt aangetroffen en die het oppervlakteveen wordt genoemd). Er waren echter enkele gebieden waar geen veen werd gevormd, zoals in de Moeren en in de toenmalige zeegaten waar verder zand of klei werden afgezet. De kustlijn bevond zich een stuk meer zeewaarts dan de huidige positie, zeker voor wat het oostelijk deel betreft.

Na 2000 tot 3000 jaar veengroei kwam het kustgebied in een nieuwe fase terecht waarbij het terug evolueerde naar een slikken- en schorregebied. De reden hiervoor blijft onduidelijk maar mogelijkwerwijs zorgde een verhoogde waterafvoer vanuit het achterland voor reactivatie van geulen. Klimatologische veranderingen met misschien de eerste gevolgen van een menselijke aanwezigheid in het gebied zouden hiervan aan de basis kunnen liggen. De geulen zorgden voor het ontwateren van de veenlagen met inklinking als gevolg. Terzelfdertijd bleef de zeespiegel stijgen maar de veengroei volgde uiteraard niet. Het gevolg is dat er opnieuw ruimte ontstond voor sedimentatie. Dit sediment was afkomstig van het uitschuren van de oudere

Holocene sedimenten en, vooral, van het eroderen van de kustlijn. De kustlijn schreed daardoor terug landwaarts. Tijdens deze periode kon het zeewater gemakkelijk de ondergrond indringen. Pas zo'n 1400 à 1200 jaar geleden (i.e. 600 tot 800 AD) was er een dynamisch evenwicht bereikt waardoor het grootste deel van de kustvlakte kon evolueren naar een slikken- en schorregebied. Op dat moment begon de mens ingrijpend z'n stempel op het gebied te drukken door bedijking en inpoldering.



Figuur 2.2 Paleogeografische reconstructie van de kustvlakte, ongeveer 5000 à 2800 jaar geleden (Mathys (2009) in combinatie met Baeteman (2005)). De zeespiegel evolueerde in die tijdspanne van 0 tot 1 m TAW. In het westelijk kustgebied zijn er twee grote zeegaten, één bij de monding van de paleovallei van de IJzer en één ter hoogte van de huidige monding van de IJzer. Het paleo-zeegat in het oostelijk kustgebied is gelegen voor het huidige Zeebrugge.

2.1.4 Inpoldering

Hoewel er zonder enige twijfel al vroegere menselijke aanwezigheid was in de kustvlakte (denk maar aan de Romeinen), begint het verhaal van de inpoldering in de vroege Middeleeuwen. In die periode ontstonden er kleine nederzettingen, logischerwijze op de hoger gelegen gebieden. Er werden zelfs vestigingen voorzien waar bewoners in tijd van nood konden schuilen. In het westelijk kustgebied is Veurne hier een voorbeeld van. Het werd gesticht in 890-891 AD door de Boudewijn II, graaf van Vlaanderen, en toont aan dat er op het eind van de 9^{de} eeuw toch al een belangrijke bewoning moet zijn geweest.

In de loop van de tijden werden die nederzettingen groter en werden er actief maatregelen getroffen om ze te beschermen tegen de zee. Dit ontstond zeer lokaal maar evolueerde naar een grotere schaal. Mogelijks vanaf de 10^e eeuw AD maar zeker vanaf de 11^e eeuw AD werd begonnen met het aanleggen van dijken waardoor getracht werd land af te scheiden van de belangrijke getijdengeulen.

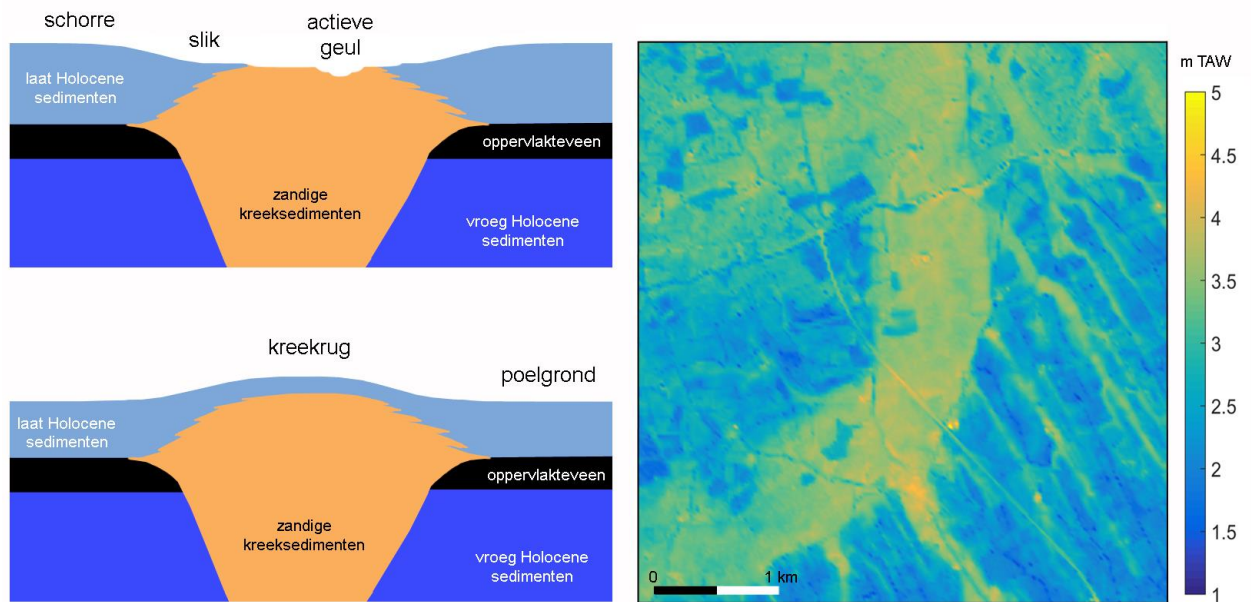
Dit betekende echter niet dat de getijdengeulen niet meer actief bleven. Het gebied rond de IJzer bijvoorbeeld was pas rond 650 AD naar een schorre geëvalueerd. De finale verlanding van het zeegat van de IJzer kwam er pas rond 1450 AD. Dus tijdens de Middeleeuwen werd er nog altijd sediment afgezet. Bij Oostende is geweten dat er rond 750 AD nog altijd een geul actief was.

De bedijking alleen was en is geen garantie dat het ingepolderde land zomaar ter beschikking kwam. Het is laag gelegen en de afkoppeling van het geulsysteem zorgde ervoor dat er van nature geen afwatering meer gebeurde. Dit moest nu artificieel tot stand gebracht worden. Er was dus met andere woorden nood aan een netwerk van afwateringskanalen in combinatie met de nodige hydraulische infrastructuur om alles in goede banen te leiden. Er ontstond een netwerk van sloten dat op enkele uitwateringspunten van keersluizen was voorzien.

2.1.5 De verdeling van zoet-zout grondwater

De drainage van het ingepolderde land zorgde voor ontwatering van de bovenste sedimenten waardoor ze konden inklinken. Het gaat daarbij over de sedimenten die ruwweg na 2000 jaar geleden zijn afgezet (dus niet het oppervlakteveen aangezien dit tijdens de inpoldering niet tot maar zeer beperkt werd ontwaterd). Zand dat in de getijdengeulen was afgezet gaat echter zeer weinig compacteren door ontwatering. Klei, die in de gebieden tussen de geulen was afgezet, kan tot 10 maal meer compacteren dan zand. Er ontstonden dus verschillende inklinkingen van de sedimenten, afhankelijk van het gebied, zijnde de oude geulen versus de tussenliggende gebieden. De oude opgevulde geulen kwamen daardoor in reliëf te liggen waardoor er een microreliëf ontstond (Figuur 2.3). Het resultaat van deze reliëfsinversie zorgt voor de opdeling die nu gekend staat als kreekruggen (oude geulen) die hoger liggen dan de tussenliggende poelgronden.

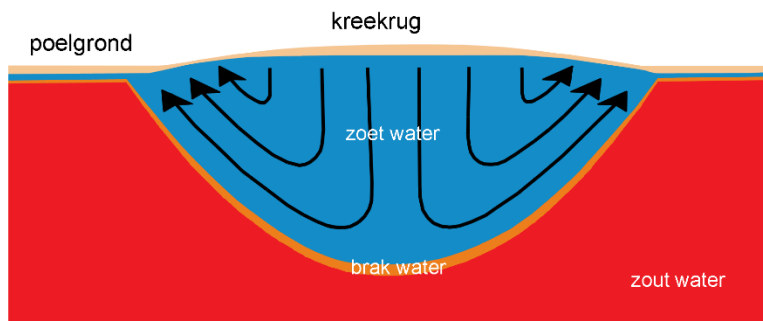
Het zijn echter niet enkel de met zand gevulde geulen die zorgden voor het huidige microreliëf. Ook de samenstelling van diepere Holocene sedimenten compacteren door de druk van bovenliggende sedimenten en variaties in dikte bepalen mede het microreliëf. Een ander aspect dat meespeelt is het tijdstip van inpolderen. Gebieden die pas laat zijn ingepolderd konden langer sediment accumuleren dan polders die eerder zijn ingepolderd. Daardoor komen die gebieden die laat zijn ingepolderd ook iets hoger te liggen.



Figuur 2.3 Ontstaan van de reliëfsinversie (links) en het uiteindelijke resultaat zoals te zien is in de topografie (rechts).

Hoe leidt dit nu tot de complexe verdeling tussen zoet en zout grondwater zoals vandaag de dag wordt vastgesteld (bijvoorbeeld Vandenbohede, 2014)? Voor de inpoldering stond het kustgebied zo goed als continu onder invloed van de zee wat betekent dat het watervoerend pakket de aquifer voornamelijk zout grondwater bevatte. Na de inpoldering veranderde dit; vanaf dat moment kon er enkel nog zoet regenwater infiltreren. Maar gans het gebied werd intens gedraineerd waardoor de hoeveelheid regenwater die effectief het watervoerend pakket kan voeden, beperkt was en is. Die drainage gebeurt aan de hand van greppels en buisdrainage die uitmondten in sloten die het water via een ingewikkeld netwerk (zie verder) naar zee leiden. Hier is echter een verschil tussen de poelgronden en de kreekruggen. Door de zandige ondergrond en de iets hogere ligging van de kreekruggen in vergelijking met de poelgronden (die lager liggen en veelal uit minder goed doorlatend zeer fijn zand, leem of klei bestaan) is de ontwatering door greppels en sloten op de kreekruggen minder intens. Op de kreekrug kan dus iets meer water infiltreren dan in de poelgronden waar dit zeer beperkt is en ligt de grondwatertafel hoger. Het microreliëf en de hogere grondwatertafel in de kreekrug zorgen voor een stijghoogteverschil tussen kreekrug en poelgrond waardoor water dat op de kreekrug infiltreert richting de poelgrond stroomt. Dit zoete infiltratiewater verdrong het oudere zoute grondwater en vormde een zoetwaterlens (Figuur 2.4).

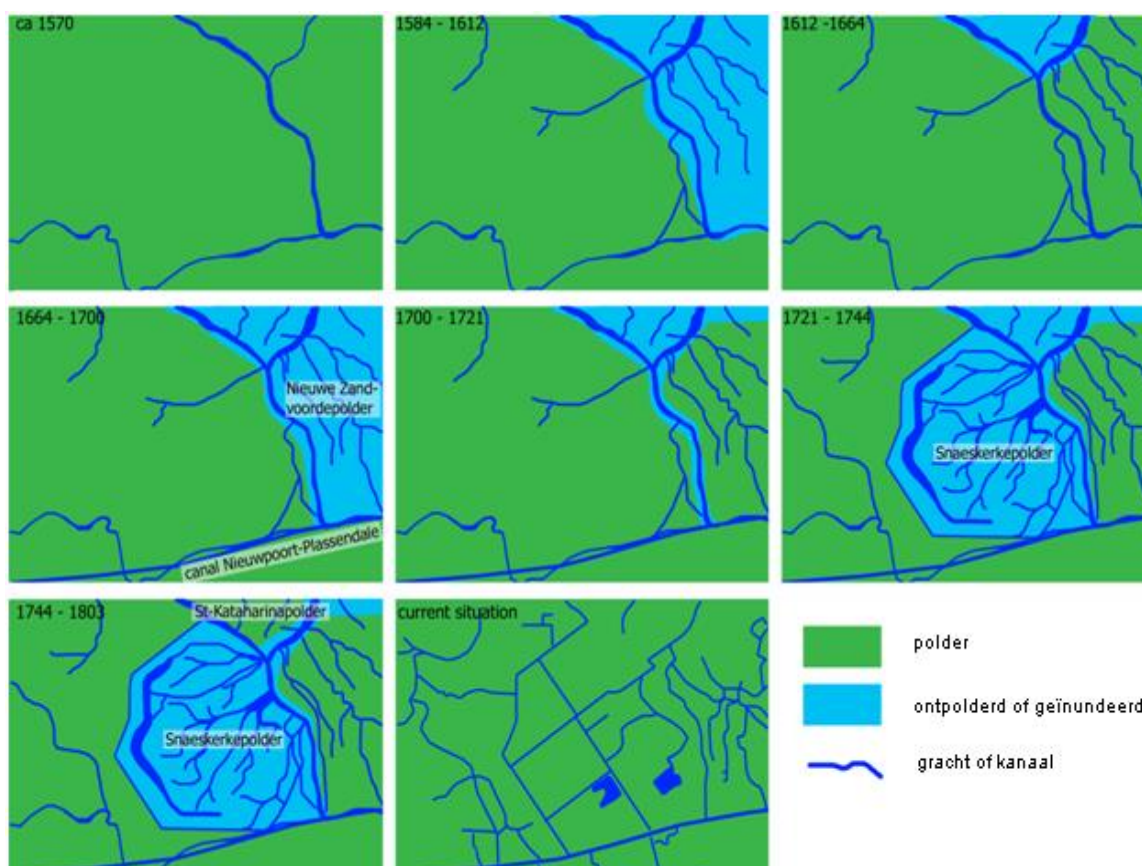
Het aanwezige zoute grondwater is dus oud; het is zeker geen recent zeewater zoals nog soms abusievelijk wordt gedacht. En de Holocene geologie vormt de blauwdruk van het complexe patroon dat op de verziltingskaart te zien is.



Figuur 2.4 Regenwater infiltreert op een kreekrug, stroomt naar de randen en verdringt daar het oudere zoute grondwater. Na verloop van tijd ontstaat een stabiele zoetwaterlens.

2.1.6 Van inpoldering naar ontpoldering

Eenmaal ingepolderd betekent niet voor altijd ingepolderd. Het gebied rond Oostende, wat gekend staat als de 'Historische Polders van Oostende' en wat binnen het studiegebied valt, is hier een voorbeeld van. De geschiedenis is in detail opgetekend door Farasyn (2006). Nadat het gebied tussen 1584 en 1604 geïnnundeerd werd door de Geuzen om de Spanjaarden buiten de stad te houden, werden nadien delen aan de zee gelaten. Gedacht werd dat getijdenwerking de havengeul van Oostende zou openhouden. Tot het begin van de 19^{de} eeuw zijn zo verschillende gebieden ontpolderd geworden. Figuur 2.5 illustreert dit voor de omgeving van de Snaeskerkepolder. In het ontpolderd deel kon terug tijdelijk zeewater infiltreren. Tenzij mogelijk in details, valt hier in de huidige verdeling van zoet-zout grondwater niets meer van te merken. Het doel van dit alles, het openhouden van de havengeul, mislukte echter jammerlijk, tot uiteindelijk de huidige Spuikom werd gegraven. Ontpolderen blijft ook nu nog actueel, denk maar aan de uitbreiding van het Zwin en de realisatie van het Grenspark Groot-Saeftinghe.



Figuur 2.5 Ontwikkeling van de Snaeskerkepolder als deel van de Historische Polders van Oostende (uit Vandenbohede et al., 2011).

2.2 Hydrografie (ontwatering en polders)

2.2.1 Het huidige afwateringssysteem

Zoals aangehaald in 2.1.4 is er in het poldergebied een dicht netwerk van grachten nodig om het land bewoonbaar en bewerkbaar te houden. De waterhuishouding en de afwatering wordt bijgevolg volledig door de mens aangestuurd. Heden te dage is hier een efficiënt systeem aanwezig waarbij overtollig regenwater opgevangen wordt en via lokale drainagesystemen en pompemalen naar grotere grachten of kanalen geleid wordt die uiteindelijk bij laag water spuien in de Noordzee. In het gebied waar de potentiekaart wordt opgemaakt, zijn er twee van zulke locaties, namelijk te Oostende en te Nieuwpoort, terwijl ook een deel van het water via Frankrijk wordt geëvacueerd. Daarbij zijn er verschillende zones te onderscheiden (Figuur 2.6):

Het afwateringsgebied richting Frankrijk. De Moeren en de omgeving wateren via de Ringsloot en de Bergenvaart af naar Duinkerke. De Ringsloot watert de Binnenmoeren af terwijl de Bergenvaart water uit de Buitenmoeren, een deel van de zandleemstreek, het plateau van Izenberge en een deel van de Pistelhoek (nabij Veurne) richting Frankrijk stuurt.

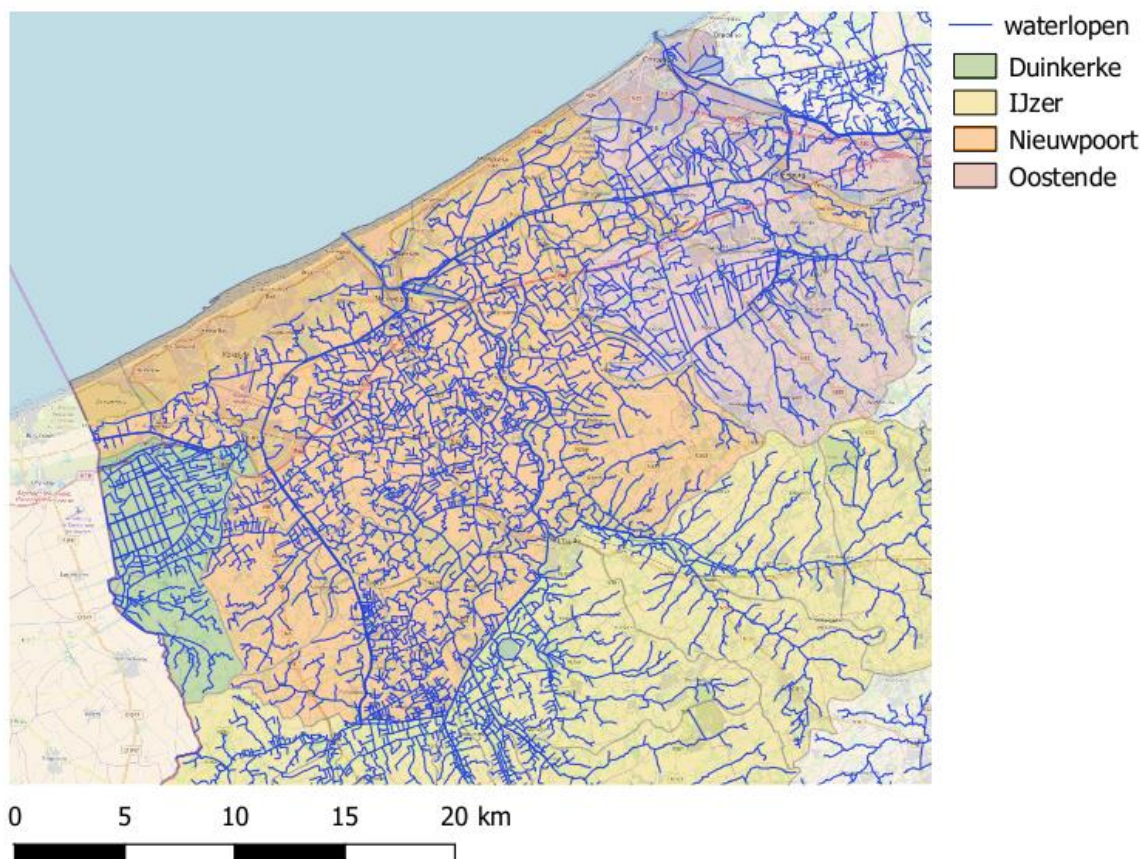
Het afwateringsgebied richting Nieuwpoort, zone westkust. Het overige gebied ten westen van de IJzer watert af naar Nieuwpoort. Dit gebeurt via verschillende waterlopen (het kanaal Duinkerke-Veurne (of Veurnevaart), het Lokanaal, de Grote Beverdijkvaart, de Koolhofvaart, de Venepevaart, het afvoerkanaal Veurne-Ambacht) die uiteindelijk uitmonden in een groot sas- en sluizencomplex, de Ganzepoot. Het kanaal Duinkerke-

Veurne is in de eerste plaats voor scheepvaart bedoeld maar doet ook dienst als afleidingskanaal van de IJzer, via de Lovaart, bij hoge watertoevoer. Een deel van de omliggende gebieden van de Lovaart worden via pompgemalen ontwaterd via dit kanaal. De Koolhofvaart en de Grote Beverdijkvaart ontwateren elk een groot gebied maar komen op ongeveer 800 m van de IJzermonding samen in het afvoerkanaal van Veurne-Ambacht (of de Noordvaart) dat in de Ganzepoot uitmondt. De Venepevaart verbindt de Koolhofvaart en de Grote Beverdijkvaart. Ook via Oude Veurnevaart kan ten westen van Nieuwpoort water gespuid worden, dit vooral afkomstig van het Langeleed dat langs de polder-duin grens loopt.

Het afwateringsgebied richting Nieuwpoort, zone middenkust. Dit is het poldergebied (deel van Gistel-Ambacht) ten noordoosten van de IJzer. Het kanaal Plassendale-Nieuwpoort (of Brugse vaart) staat in verbinding met het Ganzepootcomplex maar sluit ook aan op het kanaal Oostende-Brugge via de sluis van Plassendale. Water in dit deel van het kanaal kan zowel naar Nieuwpoort als naar Oostende gestuurd worden, waarbij Nieuwpoort de preferentiële richting is. Het overige deel van het gebied wordt ontwaterd via het Nieuw Bedelf dat aansluit op het Ganzepootcomplex en via de Vladslovaart die via de Oude IJzer (of de kreek van Nieuwdamme) de Ganzepoot bereikt.

Het afwateringsgebied van de IJzer. Vanaf de monding (of beter de aansluiting met de Ganzepoot) tot in Diksmuide is de IJzer ingekapseld tussen dijken en sluiten er geen waterlopen op aan. Stroomafwaarts van Diksmuide tot aan Elzendamme ontvangt de IJzer vooral water vanaf de rechteroever. Stroomafwaarts van Elzendamme krijgt de IJzer water van zowel de rechter- als de linkeroever. Het kanaal Ieper-IJzer, de Heidebeek, de Poperingevaart, de Kemmelbeek, de Ieperlee de Martjesvaart, het Blankaartbekken en de Handzamevaart monden uit in de IJzer.

Het afwateringsgebied richting Oostende. Het overige deel van Gistel-Ambacht watert via een aantal waterlopen, waarvan de Moerdijkvaart de belangrijkste is, af naar het kanaal Plassendale-Nieuwpoort wat op zijn beurt te Oostende in de zee uitmondt. Een aantal waterlopen gelegen ten noorden van het kanaal Plassendale-Nieuwpoort watert tenslotte eveneens af naar Oostende.



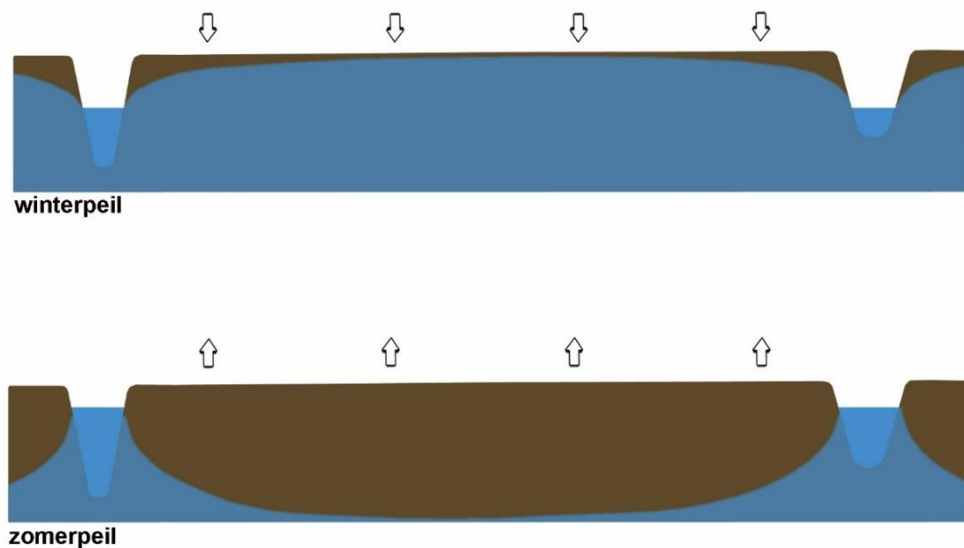
Figuur 2.6 De verschillende afwateringsgebieden naar Duinkerke, de IJzer, Nieuwpoort en Oostende in het kustgebied ten westen van Oostende zoals gedefinieerd in de bekkenbeheerplannen. Water dat via de IJzer uit het gebied verwijderd wordt, wordt eveneens via Nieuwpoort gespuid.

2.2.2 Zomer- en winterpeil

Hoewel afwatering het meest in het oog springt, hebben de polderwaterlopen zowel een drainerende als irrigerende functie (Figuur 2.7). Tijdens de winter is er meestal water te veel in het gebied en is er de noodzaak om overtollig regenwater (zo snel mogelijk) naar zee te leiden. De peilen in de grachtenwaterlopen worden daardoor kunstmatig laag gehouden zodat ze in staat zijn het overtollige water tijdelijk te bergen en af te voeren. Daarbij wordt ook de grondwaterstand in de hand gehouden en belet dat de landbouwgronden 'waterziek' zijn.

Tijdens de zomer is de situatie helemaal anders. Door de hoge evaporatie is er geen neerslagoverschot en dalen de grondwaterpeilen wat tot droogteschade aan gewassen leidt. Om dit tegen te gaan wordt water in de waterlopen gehouden en wordt er gestreefd om het peil relatief hoog (in ieder geval hoger dan tijdens de wintersituatie) te houden. Dit geeft water ter beschikking voor kunstmatige beregening van gewassen, helpt ook om de watertafel in de aanpalende gronden niet te diep te laten wegzinken en gaat verzilting van slootwater tegen. De waterlopen werken in dit geval dus irrigierend.

Winter- en zomerstreefpeilen kunnen van streek tot streek verschillen. In het centrale deel van de Westkustpolder zijn de waarden bijvoorbeeld +1.8 en +2.1 m TAW.



Figuur 2.7 Tijdens de winter hebben de polderwaterlopen een drainerende werking op de aanpalende gronden; tijdens de zomer is dit irrigierend.

2.2.3 Enkele historische ontwikkelingen

Het ontstaan van het afwateringssysteem, de kanalen, waterlopen en de verschillende hydraulische kunstwerken kent een lange geschiedenis waarbij verschillende factoren een rol hebben gespeeld. In wat volgt worden slechts enkele aspecten aangehaald. Voor een uitgebreide behandeling wordt verwezen naar Termote (2016) en Van Pul (2018).

Naast afwatering zijn er nog een aantal andere factoren die de ontwikkeling van de waterlopen vanuit historisch perspectief vorm hebben gegeven. Het netwerk van waterlopen heeft niet alleen een afwateringsfunctie, ook voor de handel en personenvervoer bleken ze al gauw belangrijk. De economische waarde van de kustvlakte was immers vrij groot door de aanwezigheid van grondstoffen zoals klei, veen en zout. In de 12^{de} en 13^{de} eeuw werden dan ook kanalen waterlopen aangelegd voor de verhandeling van deze producten.

Het beheer en onderhoud van de waterlopen is complex en moest georganiseerd gebeuren. Zowel bevaarbaarheid, afwatering, en bevloeiing moesten op elkaar afgesteld raken. Daarom ontstonden in de 12^{de} en 13^{de} eeuw de Wateringen en deze functioneren nog, als de Polders (een openbaar bestuur), tot op de dag van vandaag.

Het feit dat de waterlopen door boten, weliswaar platbodems, moesten kunnen gebruikt worden, betekende dat er water in de grachten moest staan. Maar tegelijkertijd waren de drainagetechnieken niet zo efficiënt als wat we nu kennen. Het gevolg was dat het drainagepeil hoger lag, en dit zeker in de poelgronden, dan nu. De efficiënte hedendaagse drainage is er maar gekomen door het toepassen van buisdrainage na de Tweede Wereldoorlog.

De bedijking die aangelegd werd rond de grote geulen bleken economisch interessante vaarwegen te creëren tussen de grote steden en de zee. De geul die Brugge tot begin de 10^{de} eeuw rechtsreeks verbond met de zee, lang voordat dit via het Zwin gebeurde, is hier een mooi voorbeeld van. Deze waterlopen kregen veelal een hoger peil dan de omliggende polders en werden zodoende kunstmatige waterscheidingen. De tussenliggende gebieden werden afgesloten bekkens waar eigen ontwateringspunten voor moesten worden gezocht. In de vroege Middeleeuwen speelden de drie grote steden in Vlaanderen, zijnde Brugge, Gent en Leper, hier een drijvende rol in.

Om in de toenemende vraag naar waterwegen voor handel te voorzien werden kunstmatige ingrepen gedaan, namelijk het graven van kanalen. Ook deze moesten ingepland worden in de bestaande afwateringsinfrastructuur. De ontwikkeling van de Ganzepoot te Nieuwpoort is hier een voorbeeld van. Heden ten dage komen hier zes waterwegen samen (Figuur 2.8); drie kanalen (het kanaal Duinkerke-Veurne, de gekanaliseerde IJzer en de Plassendale-Nieuwpoort vaart) en drie afwateringsvaarten (Noordvaart, Oude IJzer/kreek van Nieuwdamme en Nieuwbedelf). Het ontstaan van dit complex kent een lange en bewogen geschiedenis.



Figuur 2.8 Luchtfoto van het Ganzepootcomplex te Nieuwpoort. Beginnend in het noorden en in wijzerzin worden aangetroffen: het Nieuwbedelf, het kanaal Plassendale-Nieuwpoort, de Oude IJzer, de gekanaliseerde IJzer, de Noordvaart en het kanaal Duinkerke-Veurne. Het is een cruciaal punt voor de afwatering van het westelijk kustgebied.

Naast afwatering en handel is er nog een derde factor die de ontwikkeling van de infrastructuur in de polders heeft bepaald en dat is het militaire aspect. Vanaf het begin werd de hydraulische infrastructuur in de meeste gevallen zo ontworpen dat het in beide richtingen kon ingezet worden: ontwateren maar ook inunderen. Inundatie was immers het wapen bij uitstek tijdens een militair conflict. De verschillende inundaties rond Nieuwpoort zijn hier schoolvoorbeelden van maar ook Oostende kent een interessante geschiedenis op dat vlak. De inundatie van de polder tussen de IJzerdijk en de spoorwegberm Nieuwpoort-Diksmuide via de Noordvaart in oktober 1914 is ongetwijfeld de best gekende inundatie. Dit laat echter geen duidelijke sporen na in de huidige verdeling van zoet-zout grondwater.

Tenslotte is het nuttig nog iets te vermelden over De Moeren aangezien dit gebied een belangrijke rol heeft gespeeld in het afwateringsverhaal van de Westhoek. In het begin van de 17^{de} eeuw vormen De Moeren twee moerasgebieden met een totaaloppervlakte van zo'n 3200 ha in de driehoek Veurne-Bergen-Duinkerke (Figuur 2.9). Op Vlaams grondgebied ontwaterde zo'n 1500 ha poldergrond af naar dit gebied en ook de IJzer stond, via de Lovaart, in verbinding met De Moeren. De Moeren vormden een enorme buffer waarbij wateroverschotten uit de omgeving werden opgevangen.

De machthebbers van de Zuidelijke Nederlanden zagen een drooglegging echter als een belangrijke uitbreiding van landbouwareaal en zo geschiedde het uiteindelijk in 1627. In de daaropvolgende decennia werden De Moeren een speelbal waarbij het gebied verschillende

malen, om militaire redenen, geïnundeerd werd en vervolgens terug ingepolderd. Het belang is echter dat het ontwateringssysteem fundamenteel gewijzigd werd. Al het water dat voorheen in De Moeren terecht kon, moest nu via Nieuwpoort of Duinkerke naar zee afgevoerd worden. Op die toenemende druk was het afwateringssysteem niet voorzien. Dit is zonder twijfel één van de factoren geweest die mede tot het complexe systeem, de Ganzepoot, te Nieuwpoort hebben geleid.



Figuur 2.9 Deel van het westelijk kustgebied zoals te zien is op de kaart Flandria, opgemaakt door Gerard Mercator en gepubliceerd in 1570 (uit Bossu, 1982). Langs de huidige Frans-Belgische grens domineren De Moeren het hydrogeografische landschap.

3 Lithologisch model deelgebieden

3.1 Introductie

Voor elk van de deelgebieden werd een lithologisch model opgesteld. Voor de deelgebieden Westelijk kustgebied (uitgesplitst in Westelijk en Centraal kustgebied), Meetjesland en Linker Scheldeoever is in dit project een nieuw lithologisch model opgesteld. Voor het eerder gevlogen deelgebied Oostelijk kustgebied is een lithologisch model afgeleid direct uit de Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen (HCOV, Meyus et al. (2000)).

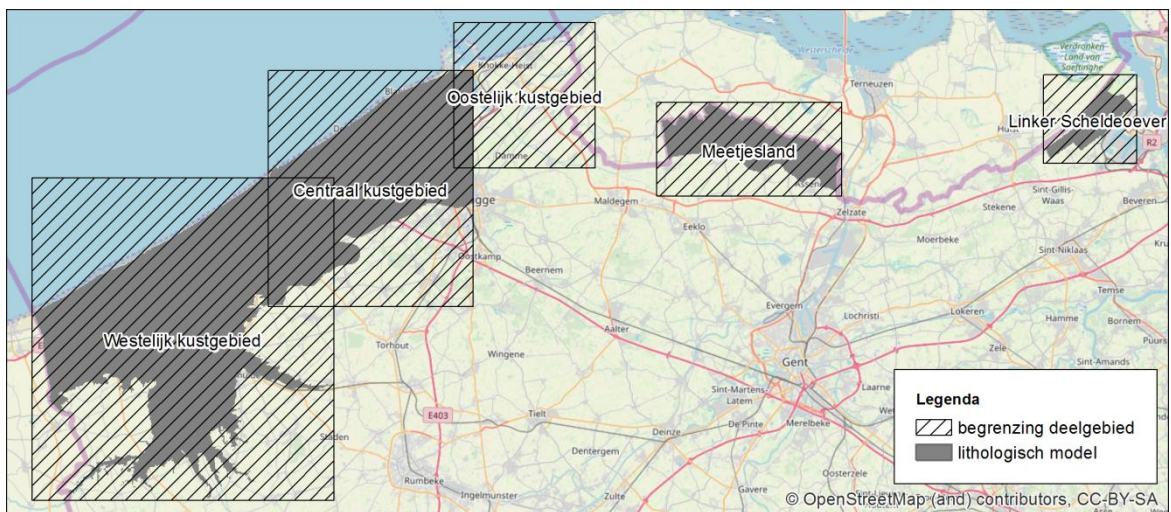
Een lithologisch model is een lagenmodel waarbij de lagen gedefinieerd worden op basis van de lithologie, niet op grond van litho- of chronostratigrafie of op grond van hun genese. Daardoor kan het gebeuren dat verschillende lithostratigrafische eenheden binnen eenzelfde laag van het model gegroepeerd werden. Daarbij werd getracht zo homogeen mogelijke eenheden af te lijnen. In sommige lagen is het door de intrinsieke heterogeniteit van de afzettingen echter niet mogelijk om tot een homogene, uniforme lithologie te komen. Anderzijds is het om praktische redenen ook niet mogelijk de talloze intercalaties binnen deze sequenties als afzonderlijke lagen in het model op te nemen en te karteren.

Elke laag wordt geometrisch afgebakend aan de hand van zijn topvlak en zijn basisvlak. Voor de lagen in het Quartair was het echter om diverse redenen vaak niet mogelijk de top- en basisvlakken gedetailleerd te karteren aan de hand van boorgegevens. Daarom werden laagvlakken vaak opgesteld aan de hand van een schematische opbouw met representatieve, gemiddelde peilen voor de top en basis. De gebruikte schematische opbouw is wel variabel binnen een deelgebied en werd afgeleid uit lithologische doorsneden en de profieltypes van de Quartair geologische kaart.

Waar er onder het Quartair ook Tertiaire lagen tot het freatisch grondwaterreservoir behoren, steunt het top- en basisvlak van deze Tertiaire lagen op het 3D geologisch model van Vlaanderen.

Het lithologisch lagenmodel van het kustgebied, tussen de Frans-Belgische grens en Zeebrugge, werd opgesplitst in twee aan elkaar grenzende deelmodellen. Het westelijke deel (verder genoemd Westelijk kustgebied) omvat de IJzervallei tussen de Franse grens en Oostende, loopt ver landinwaarts en is reeds in detail gekarteerd en onderzocht (Baeteman, 1999; 2002a; 2002b; 2005; Bertrand et al., 2005; Bogemans et al., 2016). Door dit deel van het kustgebied als een apart lithologisch deelmodel op te stellen, kon optimaal gebruik worden gemaakt van de reeds bestaande expertise en data binnen het consortium. Het tweede, oostelijke deelmodel (verder genoemd Centraal kustgebied) omvat dan het resterend deel tussen Oostende en Zeebrugge.

De laterale begrenzing van de lagenmodellen is steeds gesteund op de uitbreiding van de verzilte zone op de verziltingskaart van De Breuck et al. (1974). De spatiale resolutie is 100 m. De ligging van de deelgebieden, en het nieuwe gekarteerde gebied zijn weergegeven in Figuur 3.1, de extent van de deelmodellen is gegeven in Tabel 3.1.



Figuur 3.1 Ligging deelgebieden waarvoor een nieuw lithologisch model werd opgemaakt; voor het oostelijk kustgebied werd gebruik gemaakt van de bestaande HCOV-kartering.

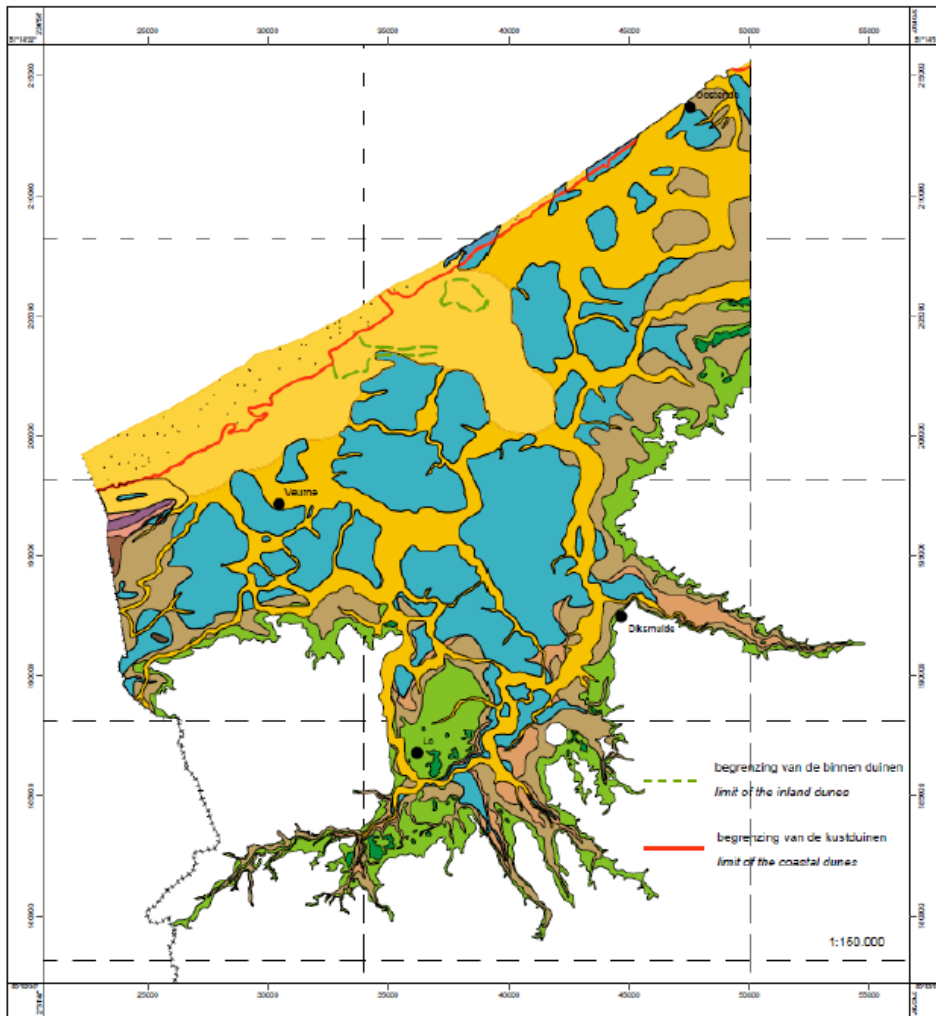
Tabel 3.1 De extent van de vijf deelgebieden in Lambertcoördinaten

Deelgebied	X _{min}	X _{max}	Y _{min}	Y _{max}
Westelijk kustgebied	22200	54900	178900	213900
Centraal kustgebied	47800	70000	199900	225500
Meetjesland	89900	110000	211900	222000
Linker Scheldeoever	131900	142000	215400	225000
Oostelijk kustgebied	67950	83250	214950	230650

3.2 Deelgebied Westelijk kustgebied

3.2.1 Methodologie

- Het voorkomen en dikte van de Formatie van Tielt (modellaag 8, zie Tabel 3.2 en Figuur 3.3) zijn conform het 3D geologisch model Vlaanderen.
- De basis van het Quartair is conform het 01Q_b rastergrid van het 3D geologisch model Vlaanderen.
- De basis van het Holoceen is conform de kaart van Baeteman (1999).
- De indeling en opbouw van het Holoceen zijn afgeleid uit de Quartaire profieltypenkaart van Baeteman (Figuur 3.2). Daarbij werden verschillende profieltypes gekoppeld aan een karakteristieke opbouw van het bovenste deel van het freatisch grondwaterreservoir. De omrekening van profieltype naar opbouw gebeurt per punt van het grid van het lithologisch model. Aan elk gridpunt werd het overeenkomend profieltype toegekend.



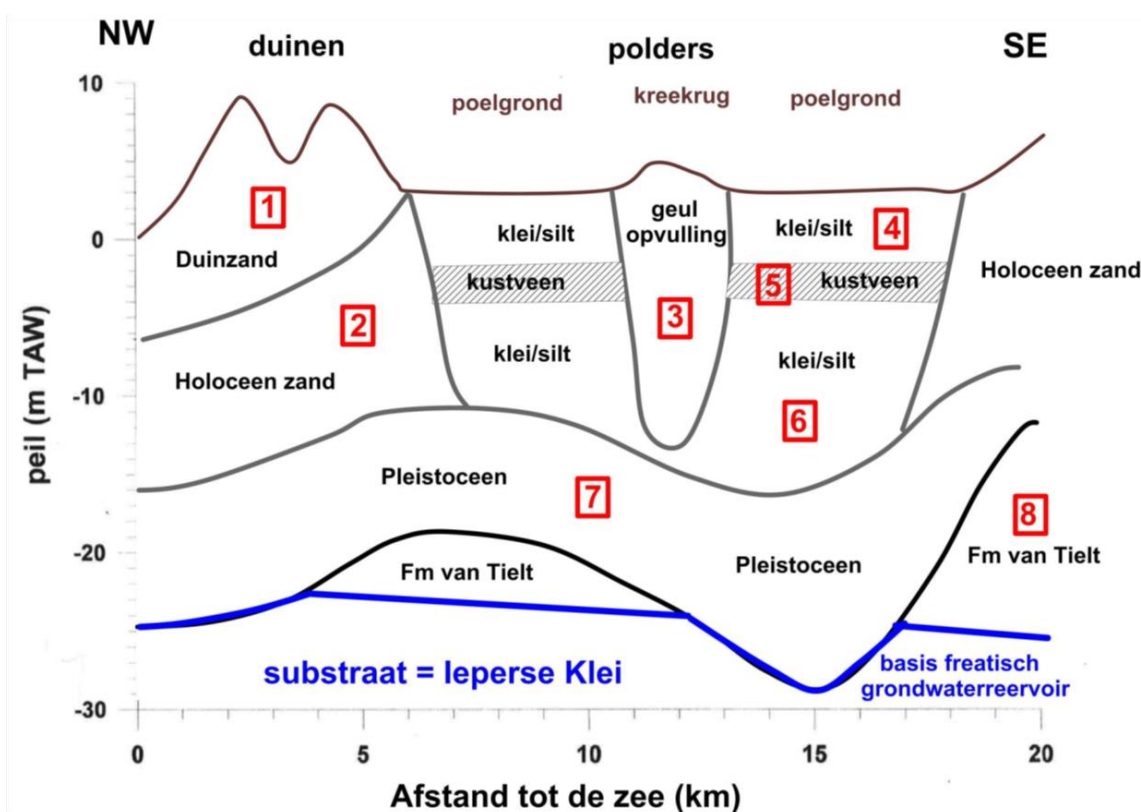
Figuur 3.2 Quartaire profieltypenkaart (Baeteman, 1999)

3.2.2 Lagenopbouw

De basis van het freatisch grondwaterreservoir wordt gevormd door de “Ieperse Klei” (Formatie van Kortrijk). Daarboven werden 8 lagen onderscheiden, waarvan de onderste laag tot het Tertiair behoort (Tabel 3.2 en Figuur 3.3):

Tabel 3.2 Laagindeling deelgebied Westelijk kustgebied

Laag	Omschrijving	Dominante lithologie
1	De bovenste laag wordt gevormd door het duinzand in de duingordel.	zand
2	Bestaat uit overig Holoceen zand.	zand
3	Deze laag bestaat uit zandige geulafzettingen (onder de kreekkruggen).	zand
4	Bestaat uit Holocene silt/klei lagen die boven het kustveen voorkomen.	silt/klei met eventueel zand en veenintercalaties
5	Wordt gevormd door het kustveen of oppervlakteveen.	veen
6	Bestaat uit Holocene silt/klei lagen die onder het kustveen voorkomen. In deze laag kan ook veen zitten dat aan de basis van het Holoceen voorkomt.	silt/klei met eventueel zand en veenintercalaties
7	Bestaat uit de Pleistocene afzettingen, vooral uit Eemiaan.	fijn tot middelmatig zand
8	De onderste laag bestaat uit de Tertiaire Formatie van Tielt.	fijn zand tot kleihoudend zand



Figuur 3.3 Schematische opbouw van het lithologisch model in het deelmodel van het westelijke kustgebied

3.3 Centraal kustgebied: tussen Oostende en Zeebrugge

3.3.1 Methodologie

Het model maakt gebruik van de volgende grids van het 3D geologische model Vlaanderen:

- Topografie
- Basis Quartair
- Basis van de Formatie van Aalter
- Basis van de Formatie van Gentbrugge
- Basis van de Formatie van Tielt

Binnen het Tertiair werden de Formaties van Aalter, Gentbrugge en Tielt als afzonderlijke lagen in het model opgenomen (Figuur 3.4). De indeling van de Quartaire afzettingen werd afgeleid uit de zonering op de Quartair geologische kaart en enkele representatieve peilen voor de vlakken tussen de lagen:

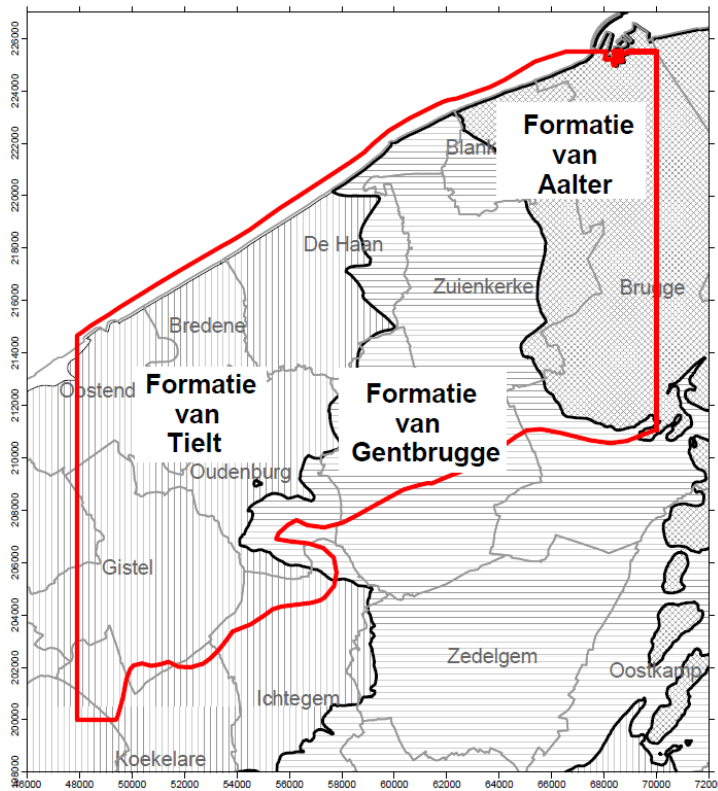
- de basis van het duinzand in de duingordel ligt op +5 m TAW.
- de basis van het Holoceen klei-veen complex ligt op peil -5 m TAW.
- de top van het Pleistoceen ligt op peil -5 m TAW.

3.3.2 Lagenopbouw

De basis van het freatisch grondwaterreservoir wordt gevormd door de “Ieperse Klei” (Formatie van Kortrijk). Daarboven werden 7 lagen onderscheiden, waarvan de onderste drie tot het Tertiair behoren:

Tabel 3.3 Laagindeling deelgebied Centraal kustgebied

Laag	Omschrijving	Dominante lithologie
1	Dit zijn de duinzanden. De basis hiervan werd op peil +5.00 genomen.	zand
2	Dit zijn Holocene geulafzettingen. Ook andere zandige lagen buiten de geulen werden in laag 2 opgenomen.	zand
3	Dit is het Holoceen klei-veen complex. Het voorkomen is afgeleid uit de Quartair geologische kaart zonder evenwel de kleinere geulen in rekening te brengen.	klei – veen – zand intercalaties
4	Dit is het Pleistoceen dat vooral uit Eemiaan afzettingen bestaat.	middelmatig zand
5	Dit is de Formatie van Aalter. De top en basis werden afgeleid uit het 3D geologisch model Vlaanderen.	fijn zand
6	Dit is de Formatie van Gentbrugge. De top en basis werden afgeleid uit het 3D geologisch model Vlaanderen.	kleihoudend zand tot klei
7	Dit is de Formatie van Ieper. De top en basis werden afgeleid uit het 3D geologisch model Vlaanderen.	fijn zand tot kleihoudend zand



Figuur 3.4 Voorkomen van de Tertiaire lagen die in het lithologisch model zijn opgenomen

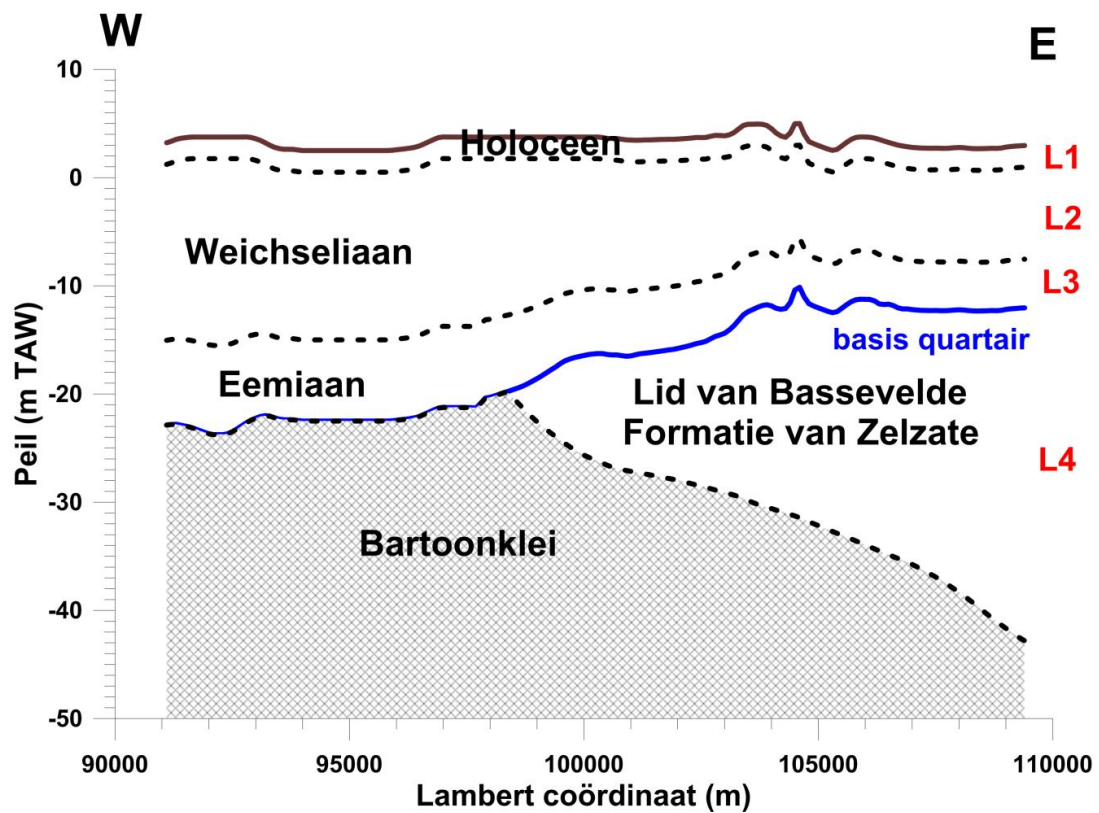
3.4 Deelgebied Meetjesland

3.4.1 Lagenopbouw

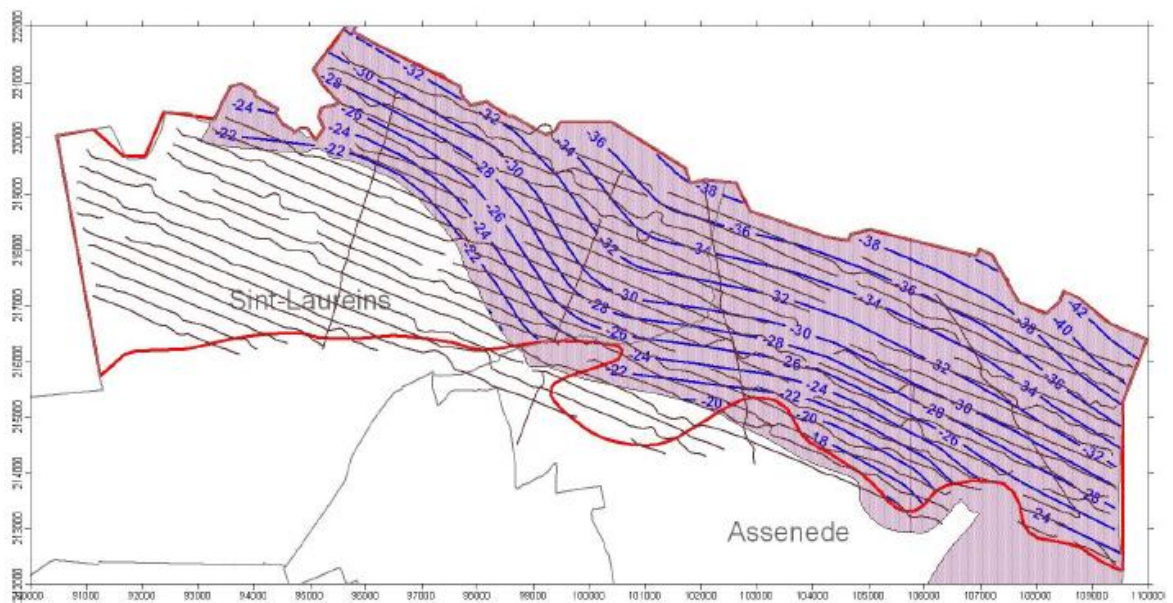
Het lagenmodel bestaat in deelgebied Meetjesland uit 4 lagen (Figuur 3.5):

Tabel 3.4 Laagindeling deelgebied Meetjesland

Laag	Omschrijving	Dominante lithologie
1	Bestaat uit de bodem en Holocene mariene afzettingen. De lithologie varieert tussen zandleem en klei.	zandleem / klei
2	Bestaat uit continentale Weichseliaanafzettingen. Deze bestaan meestal uit fijn zand tot leemhoudend zand.	fijn zand, eventueel met leem
3	Bestaat uit mariene Eemiaanafzettingen. Deze bestaan meestal uit fijn tot middelmatig zand.	middelmatig tot fijn zand
4	Onder de Quartaire bedekking worden in het oosten van het deelgebied Tertiaire zanden van het Lid van Bassevelde van de Formatie van Zelzate aangetroffen (Figuur 3.6). In het westen ontbreekt deze laag en rust het Quartair rechtstreeks op de Tertiaire Bartoonklei.	kleihoudend zand zand met klei-intercalaties
substraat	Het substraat van het freatisch grondwaterreservoir wordt gevormd door de "Bartoonklei" (Formatie van Maldegem, Tertiair). Dit is een zeer compacte kleilaag.	compacte klei



Figuur 3.5 Schematische voorstelling van de lagenopdeling in het lithologisch model van deelgebied Meetjesland



Figuur 3.6 Vluchtlijnen samen met het voorkomen en isohypsen van de basis van het Lid van Bassevelde van de Formatie van Zelzate

3.5 Deelgebied Linker Scheldeoever

3.5.1 Methode

Het Quartaire dek is meestal slechts enkele meter dik.

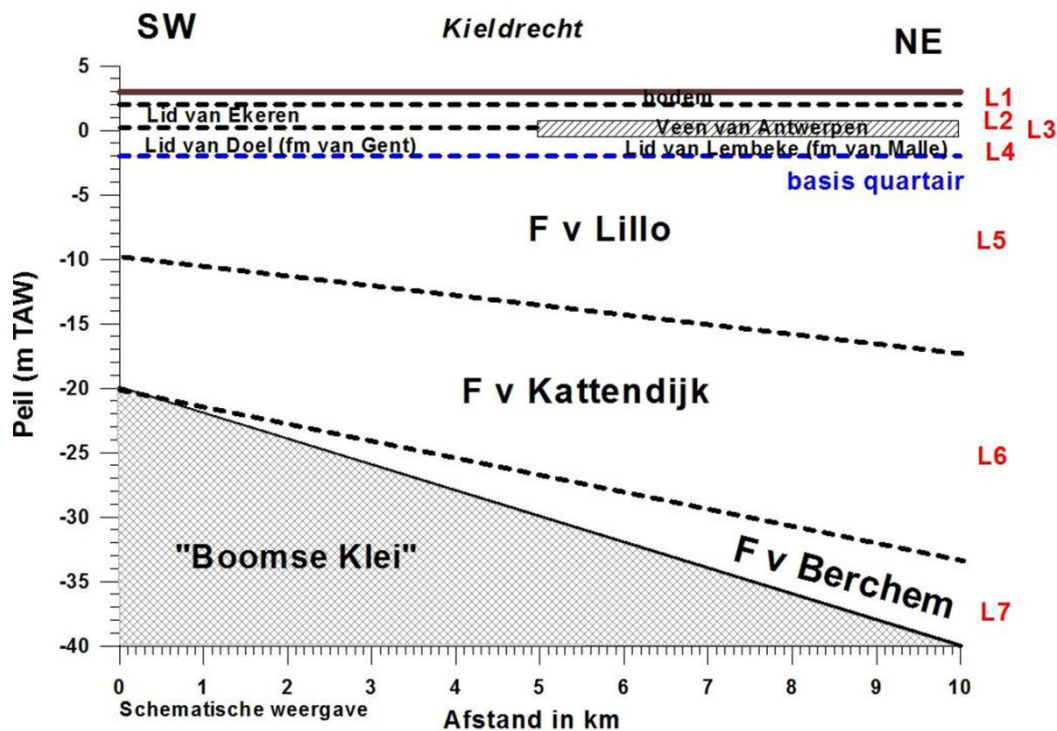
- Laag 1: De bovenste laag heeft een constante dikte van 1 m.
- Laag 2: Laag 2 bestaat uit de bovenste helft van het Quartaire dek onder de bovenste laag. Als er veen aanwezig is (ten oosten van Kieldrecht) wordt de helft van de veenlaag voor de dikte in vermindering gebracht.
- Laag 3: Aan de veenlaag ("veen van Antwerpen") werd een constante dikte van 0.5 m toegekend. Deze waarde is gebaseerd op boorbeschrijvingen. De veenlaag werd midden in het Quartair ingebouwd. Het voorkomen van het veen is afgelezen op de Quartair geologische kaart.
- Laag 4: Laag 4 bestaat uit de onderste helft van het Quartaire dek onder de bovenste laag. Als er veen aanwezig is (ten oosten van Kieldrecht) wordt de helft van de veenlaag voor de dikte in vermindering gebracht.
- Lagen 5, 6 en 7: De laagvlakken van de Tertiaire lagen werden uit het geologisch 3D model van Vlaanderen gehaald.

3.5.2 Lagenopbouw

Het substraat van het freatisch grondwaterreservoir wordt gevormd door de "Boomse Klei". Daarboven worden 7 lagen onderscheiden: 4 in het Quartaire dek en 3 in de onderliggende Tertiaire Neogene afzettingen (Figuur 3.7). De lagenindeling in het Quartair is gebaseerd op de Quartair geologische kaart. De indeling van het Tertiair steunt op de lagen in het geologisch 3D model van Vlaanderen.

Tabel 3.5 Laagindeling deelgebied Linker Scheldeoever

Laag	Omschrijving	Dominante lithologie
1	Bestaat uit de bodem en marien Holocene zandlemige tot kleiige afzettingen.	zandleem tot klei
2	Bestaat uit het zandige Lid van Ekeren (estuariene afzettingen).	zand
3	Is het "veen van Antwerpen". Komt enkel voor ten oosten van Kieldrecht.	veen
4	Deze laag bestaat ten westen van Kieldrecht uit zanden van de Formatie van Gent (eolische afzettingen) en ten oosten van Kieldrecht uit de zandige fluviatiele afzettingen van de Formatie van Lembeke.	zand
5	Deze laag wordt gevormd door de Formatie van Lillo, bestaande uit fijn zand met schelpen.	fijn zand met schelpen
6	Laag 6 wordt gevormd door de Formatie van Kattendijk, die bestaat uit zand tot kleihoudend zand.	zand tot kleihoudend zand
7	Laag 7 wordt gevormd door de Formatie van Berchem. Deze laag komt enkel voor in het noordoosten van het deelgebied, en bestaat uit zand tot kleihoudend zand.	zand tot kleihoudend zand
substraat	Het substraat van het freatisch grondwaterreservoir wordt gevormd door de "Boomse Klei".	compacte klei



Figuur 3.7 Schematische voorstelling van de lagenopdeling in het deelgebied Linker Scheldeoever.

3.6 Deelgebied Oostelijk kustgebied

Voor het deelgebied Oostelijk kustgebied is geen apart lithologisch model gemaakt. Voor dit deelgebied is gebruik gemaakt van het hydrogeologisch model van Vlaanderen (Meyus et al., 2000).

3.7 3D voxelmodel lithologie

Voor de vijf deelgebieden Westelijk kustgebied, Centraal Kustgebied, Meetjesland, Linker Scheldeoever en Oostelijk kustgebied zijn twee verschillende lagenmodellen beschikbaar: de lagenmodellen van vier deelgebieden zoals hierboven beschreven, aangevuld met het lagenmodel van de Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen (Meyus et al., 2000). Per deelgebied zijn beide modellen samengevoegd tot een enkel voxelmodel, met voxels van 50 x 50 m horizontaal en 0.5 m verticaal.

Bij het construeren van de voxelmodellen uit de lagenmodellen zijn de volgende regels in acht genomen:

- Een voxel wordt toegekend aan bepaalde laag als de voxel-midden in die laag ligt.
- De lagenmodellen van UGent en HCOV gebruiken een andere griddefinitie. Het UGent lagenmodel heeft gridcelmidden op 0, 100, etc., het HCOV lagenmodel op 50, 150, etc. Voor het voxelmodel is bij vier van de vijf deelgebieden de griddefinitie aangehouden zoals gebruikt door UGent. Voor het deelgebied Oostelijk kustgebied is enkel het HCOV lagenmodel beschikbaar, en is de HCOV griddefinitie gebruikt.

- De lagenmodellen van de UGent en het HCOV zijn onderling niet consistent. Daar waar een conflict optreedt tussen beide lagenmodellen (bijv. een voxel valt binnen een laag van zowel UGent als HCOV) is gekozen voor de oplossing van het UGent model. Daar waar er gaten vallen tussen de onderkant van het UGent model en de bovenkant van het HCOV model is de bovenste HCOV laag 'opgerekt' tot de onderkant UGent model.

Een overzicht van de gebruikte lagen en codering in het voxelmodel is opgenomen als appendix A.

4 Database ground truth waarnemingen

4.1 Introductie

Voor validatie van de helikoptermetingen wordt gebruik gemaakt van verschillende typen grondmetingen ('ground truth'). Dit betreft chemische analyses van het grondwater (chloride, elektrische geleidbaarheid) in diverse piezometers en verschillende geofysische meettechnieken (boorgatmetingen, VES, SlimFlex). Deze metingen komen uit verschillende bronnen (aangeleverd door de opdrachtgever VMM, uit de archieven van Universiteit Gent – LTGH, nieuw uitgevoerde metingen). Om deze metingen in het project te kunnen gebruiken dienen deze in een eenduidige, digitale database te worden samengebracht.

4.2 Chlorideconcentraties grondwater

De dataset bestaat uit de combinatie van meetgegevens uit:

UGent-LTGH archief

De analyses in het LTGH archief betreffen meestal éénmalige analyses die in het kader van onderzoek zijn uitgevoerd. De ligging van deze meetpunten is meestal geclusterd omdat ze geconcentreerd zijn in specifieke onderzoeksgebieden.

VMM (DOV data)

Dit zijn tijdreeksen die steeds meerdere recente jaren (vaak minstens 10, na 2004) omvatten. Voor elke tijdreeks werd de gemiddelde chlorideconcentratie berekend die als een representatieve waarde voor het meetpunt wordt beschouwd. De ligging van de monsternamenpunten is zeer uniform, Het aantal punten is wel beperkt, de filterstelling is bij vrijwel allemaal ondiep. De gegevens werden door de opdrachtgever aangeleverd als een enkel bestand dat analyses uit alle HCOV eenheden bevat in een strook die het hele kustgebied omvat en het noorden van West- en Oost-Vlaanderen. Daaruit werden de analyses geselecteerd met een HCOV code van minder dan 200 en werd een opsplitsing in de drie deelgebieden (Westelijk- en centraal kustgebied, Meetjesland, Linker Scheldeoever) gedaan op basis van de coördinaten.

4.3 Geofysische resistiviteit boorgatmetingen

UGent-LTGH beschikt over een archief met geofysische resistiviteit boorgatmetingen die in het kader van wetenschappelijk onderzoek, thesissen en diverse projecten zijn uitgevoerd. Deze bevatten meestal long normal (LN) en short normal (SN) opnames. Uit de dieptecurven werden gemiddelde LN resistiviteiten berekend per diepte-interval van 1 m. In het deelgebied "Linker Scheldeoever" had het LTGH geen meetgegevens die binnen het studiegebied vallen. Voor dit gebied zijn er wel elektromagnetische inductiemetingen voorhanden (zie verder). Naast de bij UGent-LTGH beschikbare boorgatmetingen zijn door VMM een tiental boorgatmetingen (LN/SN opnames) in het Meetjesland aangeleverd die in het Scaldwin project (Lebbe et al., 2012) zijn verzameld.

4.4 Elektromagnetische inductie boorgatsonde

Door VMM zijn meetgegevens aangeleverd van een elektromagnetische inductie boorgatsonde. Deze sonde meet de elektromagnetische geleidbaarheid van de ondergrond in een bestaande grote-diameter peilbuis. Deze metingen zijn uitsluitend beschikbaar in het deelgebied Linker Scheldeoever.

4.5 Vertical Electrical Soundings (VES)

4.5.1 Introductie

UGent-LTGH beschikt over een uitgebreid archief van VES metingen die vooral in jaren 1960 en 1970 werden uitgevoerd. Daarbij liggen meestal ca 100 metingen op elk NGI kaartblad. De metingen werden na hun opname geïnterpreteerd. Uit de VESSen werd een resistiviteitsmodel met een beperkt aantal discrete lagen bekomen, meestal slechts 2 tot 4 lagen. Deze interpretaties werden in het verleden gebruikt voor het opstellen van de verziltingskaarten van 1974 en 1989. Sommige metingen zijn verstoord en daardoor niet aangewezen om te gebruiken. Selectie van de VESSen is gebeurd na een visuele kwaliteitscontrole van de grafieken. De interpretatieresultaten van geselecteerde VESSen werden in een bestand verzameld.

4.5.2 Methode

Er werd een workflow ontwikkeld die toeliet zo veel mogelijk resultaten in de database op te nemen.

Digitalisatie van de ligging

In het LTGH archief zijn de VES metingen georganiseerd per NGI kaartblad op schaal 1:10000. Per kaartblad is een kaart met de ligging van de VES metingen aanwezig. Deze kaarten werden ingescand op een resolutie van 300 dpi en gegeoreferend. Vervolgens werd de ligging van de VESSen gedigitaliseerd als een puntenlaag waarbij het centrum van de elektrodenlijn als de plaats van de meting genomen wordt. Voor deze digitalisatie van de ligging werd Quantum GIS gebruikt.

Digitalisatie van de interpretaties

In de dossiers werden de meetdata en de interpretaties opgezocht. Soms bevinden de interpretaties zich op het formulier van de meetdata, maar meestal werden de interpretaties neergeschreven op speciale kleine papierstrookjes die bij de meetdata werden gevoegd ofwel samen werden gebundeld per kaartblad. Soms kon de papierstrook met de interpretatie niet worden teruggevonden. Per kaartblad werd een excel tabel aangemaakt waarin het VES nummer, het aantal lagen van de interpretatie en de resultaten van de interpretaties werden opgenomen.

Koppeling van VESSen met hun interpretatie

Vermits digitalisatie van ligging en interpretatie onafhankelijk van elkaar gebeurde, kan het voorvallen dat voor een VES meting geen interpretatie gevonden werd (bijvoorbeeld omdat de meting niet interpreteerbaar was vanwege storingen of omdat de interpretatie uit het dossier verdwenen is). In een zeldzaam geval kon de VES niet gelokaliseerd worden hoewel er een interpretatie bestond vanwege verwarring op de liggingskaart.

Uit de puntenlaag met de ligging van de VESSen werden de Lambert coördinaten gehaald (uit de attribuentabel) en via het VES nummer gekoppeld aan de interpretaties in de excel files. Daarna werden de opeenvolgende lagen van de interpretatie samen met de coördinaten van de meting in een bestand weggeschreven waarbij de diepte van de top en basis van elke laag en de resistiviteit worden toegevoegd.

4.5.3 Problemen en limitaties bij de digitalisatie

De volgende problemen werden ondervonden:

- Op sommige kaartbladen ontbraken de dossiers met VES metingen volledig. Wellicht zijn deze in de loop van de tijd uit de dossiers genomen (bijvoorbeeld in het kader van een onderzoek) en nooit terug geplaatst.
- Op sommige kaartbladen ontbrak de kaart met de ligging van de VESSen. Hierdoor kunnen de interpretaties niet aan een ligging gekoppeld worden.
- Op sommige kaartbladen ontbraken alle interpretaties. Soms konden individuele interpretaties niet gevonden worden.
- Vermits de liggingskaarten manueel werden opgesteld (meestal in de jaren 60) was het identificatienummer van sommige VESSen niet goed leesbaar. De ligging van enkele VESSen kon daardoor niet bepaald worden.
- Hoewel het inscannen en de georeferencing met de uiterste zorg werden uitgevoerd, kunnen hierdoor kleine afwijkingen op de ligging optreden.

In het deelgebied Meetjesland werden volgende problemen vastgesteld:

- Van kaartblad 5/8 kon geen liggingsplan van de VESSen worden teruggevonden.
- Van kaartblad 6/5 ontbraken de VESSen in het dossier.
- Van kaartblad 14/1 ontbraken de VESSen in het dossier.

In het deelgebied Linker Scheldeoever werden volgende problemen vastgesteld:

- Van kaartblad 7/5 (Kieldrecht) ontbraken de VESSen in het dossier.
- Van kaartblad 15/2 (Doel/Kallo) ontbraken de VESSen in het dossier.

4.6 SlimFlex metingen kustregio

Op 22 en 23 november 2017 zijn door Deltares op acht locaties in Vlaanderen metingen uitgevoerd met de SlimFlex (elektromagnetische inductie logging) (Tabel 4.1). Veldtoegang werd geregeld door de VMM. De meeste metingen zijn uitgevoerd tot een diepte van tenminste 50 m onder maaiveld. In peilbuis 3-0082 kon niet zo diep worden gemeten, omdat de peilbuis slechts tien meter diep was.

De Slimflex, ontwikkeld door Antares (Duitsland) en Deltares, is een EM-sonde met beperkte diameter, die speciaal is ontwikkeld om in standaard bestaande peilbuizen te worden gebruikt. Het meetprincipe van het instrument is min of meer gelijk aan EM inductie logging instrumenten (zie elektromagnetische boorgatsonde); een alternerende stroom wordt geproduceerd in een 'zendspoel', wat leidt tot een primair elektromagnetisch veld. In de ondergrond veroorzaakt dit primaire EM veld wervelstromingen, die resulteren in een secundair EM veld. Beide velden worden gemeten in een ontvangstspoel. De bulk geleidbaarheid van de ondergrond is gerelateerd aan het verschil (fase en amplitude) tussen de twee velden.

Tabel 4.1 Overzicht uitgevoerde SlimFlex metingen.

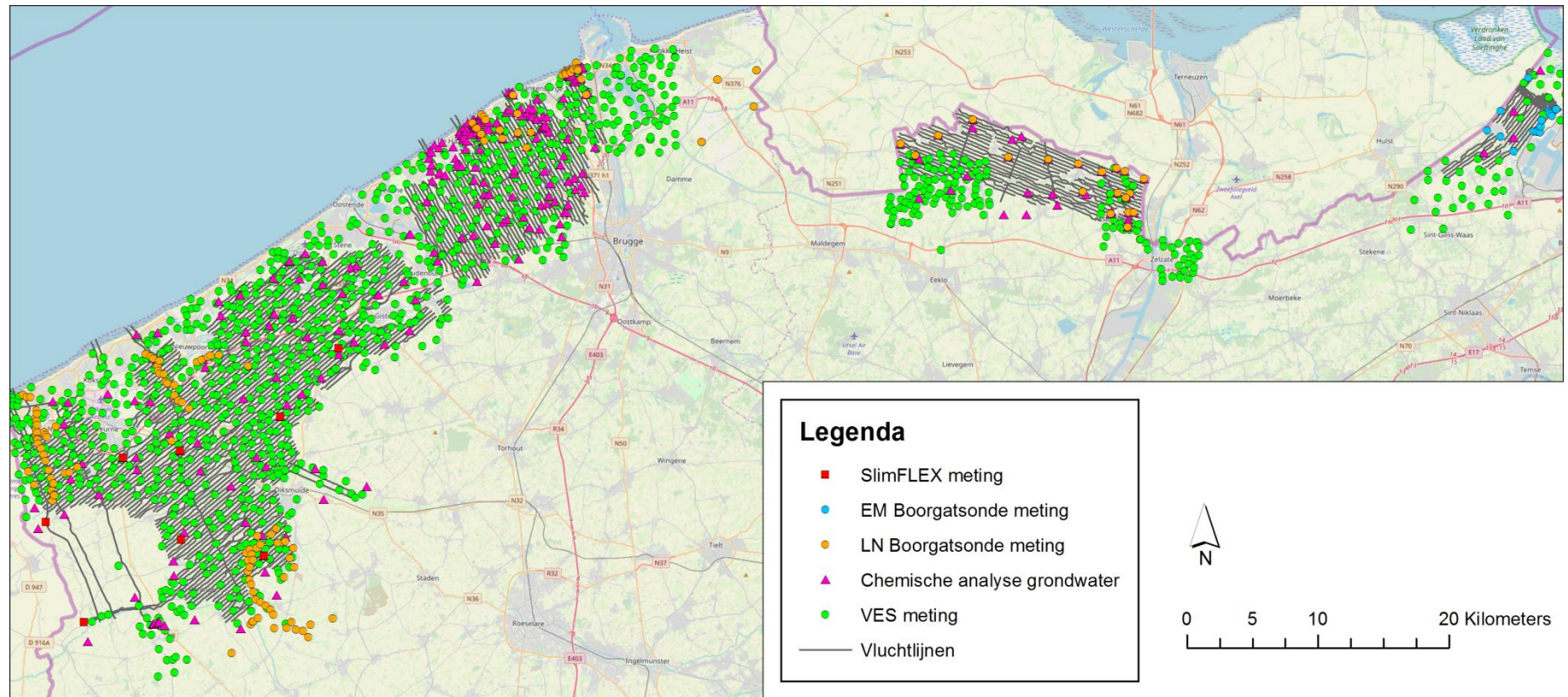
Piezometer	X coördinaat (m)	Y coördinaat (m)	Diepte (m)	Datum logging
3-0077	43724	198063	102	22-11-2017
3-0079	42448	187428	125	22-11-2017
3-0082	31686	194932	10	23-11-2017
3-0506b	36134	188655	100	22-11-2017
3-0513b	28714	182364	125	23-11-2017
3-0514	25786	190028	100	23-11-2017
3-0515b	48168	203275	50	22-11-2017
3-0518b	36065	195471	52	23-11-2017

4.7 Resultaten

De gerealiseerde database bevat in totaal 1045 chlorideanalyses van het grondwater, en 1345 verschillende geofysische metingen van verschillende typen. De geofysische metingen betreffen voor het grootste deel Vertical Electrical Soundings, en daarnaast verschillende boorgatmetingen. De locaties van de verschillende metingen zijn weergegeven in Figuur 4.1, de verdeling over de verschillende typen metingen in Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Opgenomen metingen in de ground truth database.

Meting	Aantal opgenomen in database
Chlorideanalyse grondwater - ondiep	754
Chlorideanalyse grondwater – diep (HCOV > 200)	291
Boorgatmeting	387
Elektromagnetische boorgatsonde	15
Vertical Electrical Sounding	1187
SlimFlex	8



Figuur 4.1 Overzicht beschikbare ground truth metingen.

5 Helikoptermetingen

5.1 Introductie

Airborne electromagnetics (AEM) zijn, sinds de eerste succesvolle toepassingen aan het eind van de jaren zeventig, een veelgebruikte methode geworden om zeewaterintrusie en zoete grondwatervoorkomens te karteren (Fitterman and Deszcz-pan, 1998; Fitterman and Stewart, 1986; Sengpiel and Siemon, 2000; Sengpiel and Meiser, 1981; Siemon et al., 2009). Omdat de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond sterk wordt bepaald door de elektrische geleidbaarheid van het grondwater, is de methode hier ook erg geschikt voor. De huidig toegepaste AEM systemen zijn in verschillende studies vergeleken met grondmetingen, met goede resultaten (bijvoorbeeld De Louw et al. (2011), of het EU CliWat project (Støvring Harbo et al., 2011)).

Dit hoofdstuk is een samenvatting van de eerder opgeleverde rapportages 'Post survey report' en 'Data report' (SkyTEM, 2017a, 2017b).

5.2 Meetsysteem en kalibratietests

De surveys in dit project zijn gevlogen met het SkyTEM 304M meetsysteem (Figuur 5.1). Dit systeem bestaat uit een frame van zo'n 20 bij 25 m, dat een tijddomein elektromagnetisch (TEM) systeem, twee inclinometers (hellingmeters), twee (laser-) hoogtemeters en twee DGPS plaatsbepalingssystemen bevat. De stroomvoorziening wordt verzorgd door een generator die ongeveer 20 m boven het meetframe hangt.

Het TEM systeem zendt vanuit de achthoekige zendspoel (340.8 m^2) in het frame een elektromagnetische puls richting de aarde. Dit uitgezonden primaire elektromagnetische veld wekt een secundair elektromagnetische veld op in de ondergrond dat wordt gemeten door de ontvanger op het meetframe. De eigenschappen van dit secundaire veld zijn afhankelijk van de elektromagnetische geleidbaarheid van de ondergrond. Bij tijddomein EM wordt een puls met een vaste frequentie een bepaalde korte tijd uitgezonden waarna het zenden stopt en het verval van het opgewekte secundaire elektromagnetische veld wordt opgevangen door de ontvangspoelen. SkyTEM 304M meet met een laag- en een hoogmoment puls, waardoor zowel diep als ondiep een goede resolutie kan worden behaald. De laagmoment puls wordt uitgezonden met een stroomsterkte van 9 Ampère (geeft $\sim 3,000 \text{ Am}^2$) met een frequentie van 325 Hz. De hoogmoment puls wordt uitgezonden met een stroomsterkte van 71 Ampère (geeft $\sim 100,000 \text{ Am}^2$) met een frequentie van 75 Hz.



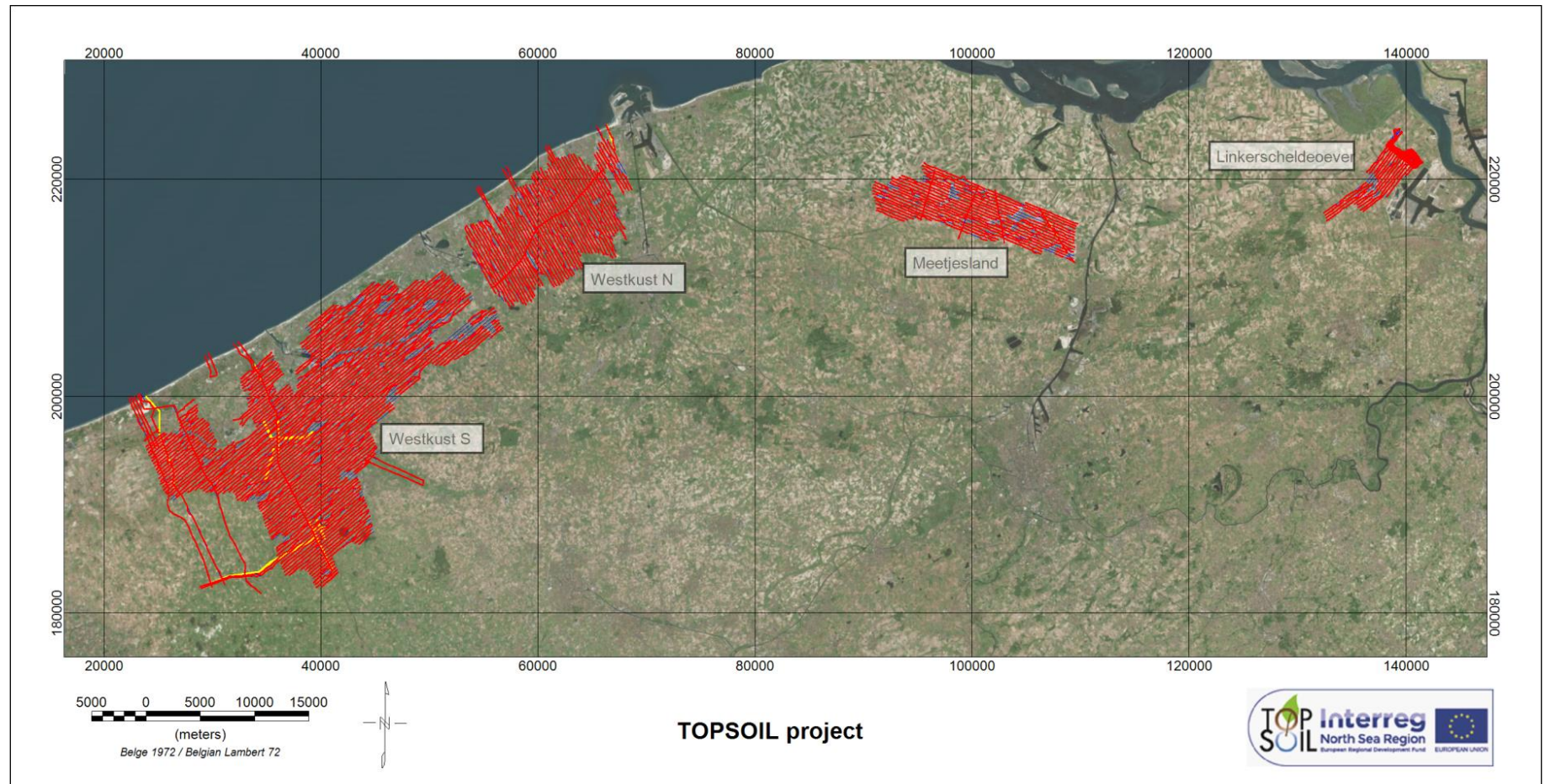
Figuur 5.1 Helikopter en meetframe boven Oostende-Brugge Airport.

Het SkyTEM 304M systeem is gekalibreerd op de Deense Nationale Referentie locatie. Hierbij wordt op verschillende hoogten gevlogen en gemeten. Met dezelfde set kalibratieparameters moet de referentielocatie op elk van deze meethoogten kunnen worden gereproduceerd. De kalibratieparameters worden vervolgens op alle verdere meetgegevens toegepast.

5.3 Gerealiseerde vlieglijnen

Het vliegplan is opgesteld in nauwe samenwerking tussen de opdrachtgever (VMM), Deltares en SkyTEM. Afwijkingen van het vluchtplan waren soms noodzakelijk voor veiligheidsredenen. Hierbij gaat het om het ontwijken van infrastructuur (hoogspanningskabels, grote wegen en bebouwing) en vee, met name paarden. De gerealiseerde vlieglijnen zijn weergegeven in Figuur 5.2. Tabel 5.1 geeft de totale geplande en gerealiseerde lijnkilometers, Tabel 5.2 de verschillende vliegparameters.

De gebieden Westkust Noord en Westkust Zuid zijn gevlogen tussen 18 en 26 juli 2017. Deze vluchten vonden plaats vanaf Oostende-Brugge Airport. Het was vooraf de vraag of er gevlogen mocht worden rond het militaire vliegveld te Koksijde. Hier is toestemming voor verleend. De gebieden Meetjesland en Linkerscheldeoever zijn, in plaats van vanaf de geplande locaties (weilanden) gevlogen vanaf een helikopterlandingsplaats in Knokke-Heist. Deze twee gebieden bevinden zich aan de grens met Nederland. Geen van de vluchten hebben de grens gepasseerd. Meetjesland is gevlogen op 27 juli, Linkerscheldeoever op 28 juli 2017.



Figuur 5.2 Gerealiseerde vlieglijnen (rode lijnen), en vliegplan (blauwe lijnen). De gele lijnen geven verschillende referentieprofielen weer die zijn gebruikt in de planningsfase van de survey, het zijn geen geplande vlieglijnen.

Tabel 5.1 Totaal geplande en gerealiseerde lijn kilometers.

Deelgebied	Geplande lijn kilometers	Gerealiseerde lijn kilometers
Westkust Zuid	1478 km	1452 km
Westkust Noord	489 km	496 km
Meetjesland	329 km	312 km
Linkerscheldeoever	117 km	114 km
Totaal	2413 km	2374 km

In het algemeen zijn er geen grote onvoorziene omstandigheden geweest die de survey hebben beïnvloed. De generator functioneerde niet gedurende één vlucht; geen data werden verzameld en de vlucht is afgebroken. De generator werd gemaakt en de productie hervat zonder verdere vertraging. Eén vlucht is afgebroken ten gevolge van de windcondities.

Tabel 5.2 Samenvatting vliegparameters.

Parameter	Gemiddeld	Standaard deviatie
Grondsnelheid	68.3 km/u	9.0 km/u
Vlieghoogte	40.8 m	15.2 m
Tilthoek x (parallel aan vliegrichting)	3.1 graden	3.7 graden
Tilthoek y (loodrecht op vliegrichting)	-0.9 graden	1.8 graden

5.4 Bewerking van ruwe meetgegevens

De ruwe meetgegevens van de helikopter ondergaan verschillende bewerkingsstappen. In deze stappen worden de meetgegevens eventueel gecorrigeerd voor afwijkingen en in het uiterste geval uit de dataset verwijderd.

De verschillende 'hulpgegevens' (positiebepaling, tiltbepaling, hoogtemeting) zijn eerst gecorrigeerd naar een positie in het midden van het meetframe, en als volgt nabewerkt:

- **Tilt.** De gemeten tilt (hellingshoek) is nabewerkt via een 3 seconde box filter en een low-pass filter van ook 3 seconden.
- **Vlieghoogte.** Hoogte van het meetframe is bepaald door een extern digitaal hoogtebestand (SRTM) af te trekken van de gemeten DGPS hoogte. Vervolgens is hierop een low-pass filter toegepast en zijn de waarden vergeleken met de laser-altimetrie metingen. Door reflectie van de laser op bomen etc. bleek de berekende hoogte beter bruikbaar dan de direct gemeten hoogte (laser-altimetrie).
- **Positie.** Coördinaten, hoogte en grondsnelheid zijn bewerkt met een low-pass filter.
- **Digitaal hoogtebestand.** Door de laser-altimetrie metingen af te trekken van de met DGPS bepaalde hoogte is een hoge-resolutie hoogtebestand gemaakt.

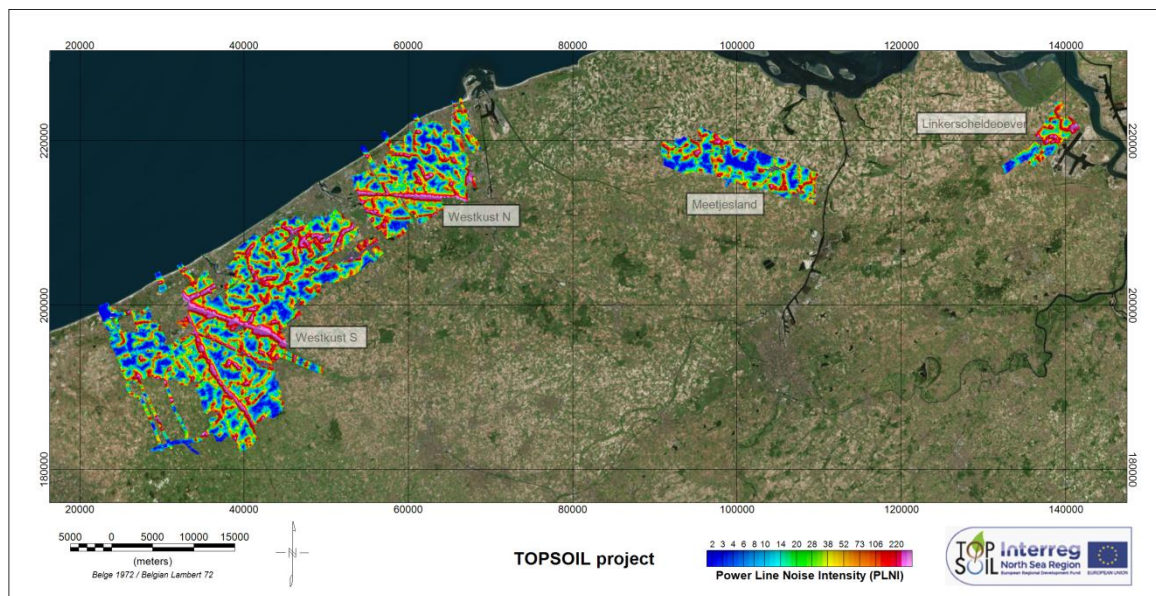
De volgende bewerkingsstappen zijn uitgevoerd op de EM gegevens:

- 1 **Primary Field Compensation.** Als allereerste stap wordt het uitgezonden signaal (het primaire magnetische veld) uit het gemeten signaal gefilterd, zodat alleen het secundaire magnetische veld overblijft.
- 2 **EM Filtering.** De gegevens worden genormaliseerd met betrekking tot het effectieve Rx spoeloppervlak, het Tx spoeloppervlak, het aantal draaiingen en de stroomsterkte. De hierop volgende filtering past zich steeds aan aan de geldende signaal-ruis-verhouding. De filtering is gebaseerd op het fitten van gewogen splines. De filtering reduceert de ruis door bewegingen van het meetframe en antropogene storingsbronnen. De onzekerheid in de data wordt bijgehouden.

- 3 **Nabewerking in Aarhus Workbench.** In de gebruikte Aarhus Workbench software worden de data verder bewerkt met automatische decoupling filters (condensator koppelfilter), en handmatige bewerking van de gegevens. Na deze stappen is de data klaar voor de inversie stap (Hoofdstuk 6).

5.5 Power Line Noise Intensity (PLNI)

Ruis afkomstig van hoogspanningskabels wordt in de nabewerkingsprocedure actief onderdrukt, maar kan desalniettemin de kwaliteit van de data negatief beïnvloeden. Op basis van de bepaalde Power Line Noise Intensity (PLNI) waarde kan een goede inschatting worden gemaakt in welke mate de meetgegevens worden beïnvloed door storing afkomstig van hoogspanningskabels. De PLNI wordt berekend met behulp van een frequentie analyse van de ruwe EM meetgegevens. Voor elke laatste 'low-moment gate' wordt met behulp van een Fourier transformatie gekeken hoe sterk er een component van de lokale hoogspanningskabel frequentie (50 Hz in Europa) in de data aanwezig is. Figuur 5.3 geeft de bepaalde PLNI voor het studiegebied, waarbij de rode kleuren een hoge verstoring aanduiden, en de blauwe kleuren een verwaarloosbare verstoring.



Figuur 5.3 Power Line Noise Intensity in het studiegebied.

Bij het interpreteren van PLNI waarden moet rekening worden gehouden met de volgende factoren die deze waarde kunnen beïnvloeden (niet gerelateerd aan hoogspanningsleidingen):

- De laag-moment EM gegevens zijn met een dermate lage meetfrequentie gemeten dat er een risico bestaat op 'aliasing': hoogfrequente signalen kunnen niet goed worden onderscheiden. Door een lange integratietijd van de 'low-moment gate' wordt dit probleem sterk gereduceerd.
- Andere ruisbronnen kunnen bijdragen aan de totale ruis op de hoogspanningsfrequentie van 50 Hz. Normaal gesproken wordt ruis op deze frequentie – bij aanwezigheid van hoogspanningskabels – evenwel gedomineerd door de hoogspanningsruis.
- De PLNI waarden zijn niet gecorrigeerd voor vlieghoogte of tilt (hoek) van het meetframe. Hierdoor kan het voorkomen dat aangrenzende vlieglijnen verschillende PLNI waarden kennen bij passeren van dezelfde hoogspanningskabel.

6 Inversie van helikoptermetingen

6.1 Introductie

De vertaling van de daadwerkelijke metingen tot een ondergrondmodel van de schijnbare resistiviteit vindt plaats door inverse modellering. Een ondergrondmodel bestaat hierbij uit een aantal lagen van variabele dikte met elk een eigen resistiviteit. Van dit model kunnen vervolgens de waarden worden berekend die door de AEM zouden worden gemeten. In de inversieprocedure wordt dan gezocht naar het model van de ondergrond, waarvan de berekende waarden het beste lijken op de gemeten waarden.

Dit inversieprobleem is echter een probleem met veel onbekenden (in principe oneindig aantal lagen met elk een weerstand en dikte) en relatief weinig metingen. Het vinden van het goede ondergrondmodel is dan ook niet eenvoudig. Meerdere verschillende modellen zullen ongeveer even goed de meting kunnen reproduceren en de wiskundige zoekmethode naar het beste model kan een zogeheten lokaal optimum vinden: dat model is beter dan alle modellen met ongeveer dezelfde parameters, maar een onbekend model met hele andere parameters kan mogelijk nog beter zijn.

6.2 Typen inversie

Veel gebruikte ondergrondmodellen zijn op te delen in twee typen, en daarmee twee typen inversies: 'layered inversion' en 'smooth inversion'. Bij de layered inversion wordt een ondergrondmodel gebruikt met een beperkt aantal lagen. In de inversie wordt van deze lagen zowel de resistiviteit als de dikte bepaald. Deze modellen geven harde laaggrenzen, zijn gevoelig voor de opgegeven initiële condities, en kleinere weerstandscontrasten kunnen verloren gaan. Dit type inversie is toegepast bij de verschillende VESsen die in het Vlaamse kustgebied zijn uitgevoerd. De andere klasse inversies, smooth inversion, past ondergrondmodellen toe met veel lagen (typisch 20 of meer). Hierbij ligt de dikte van de lagen vast en wordt alleen de resistiviteit van deze lagen bepaald. Het eindresultaat kent veelal meer detail en ook kleinere weerstandsvariaties zijn zichtbaar in het resultaat. Scherpe overgangen worden in enige mate uitgesmeerd. In het algemeen is een layered inversion te verkiezen wanneer veel bekend is over de lokale ondergrond, zodat de verkregen lagen goed geïnterpreteerd kunnen worden. Dit is bijvoorbeeld het geval bij grondmetingen, waarbij ook een lithologische boring beschikbaar is. Wanneer geen of weinig a-priori kennis aanwezig is over de opbouw van de ondergrond, is een smooth inversion te verkiezen. Dit is het geval voor grootschalige surveys. Daarom wordt bij airborne surveys in het algemeen gekozen voor een smooth inversion type (King et al., 2018).

Binnen de smooth inversion categorie zijn er verschillende inversies te onderscheiden. Bij een 'Single Site Inversion' (SSI) worden alleen gegevens van één bepaald meetpunt gebruikt. 'Laterally Constrained Inversion' (LCI) gebruikt daarnaast ook naastgelegen metingen, op dezelfde vlieglijn. Deze metingen krijgen een minder gewicht naarmate ze verder verwijderd zijn van de betreffende meting. Tenslotte maakt 'Spatially Constrained Inversion' (SCI) in de inversie ook gebruik van metingen die in de buurt, maar op een andere vlieglijn, liggen. Deze inversietechniek heeft als voordeel dat deze het abusievelijk ontstaan van langgerekte patronen langs vlieglijnen voorkomt. Dit laatste inversietype is de huidige state-of-the-art en is in dit project toegepast.

6.3 Spatially Constrained Inversion

Spatially Constrained Inversion (SCI) is een quasi-3D inversietechniek, ontwikkeld door Aarhus University (Viezolli et al., 2008). Het is een kleinste-kwadraten inversie van een horizontaal gelaagde ondergrond, geregulariseerd met ruimtelijke afhankelijkheden (constraints). Deze afhankelijkheden zorgen voor geleidelijke laterale resistiviteitsovergangen. Het inversieprobleem in formule is als volgt (Viezolli et al., 2008):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} \cdot \delta \mathbf{m}_{\text{true}} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{d}_{\text{obs}} \\ \delta \mathbf{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{\text{obs}} \\ \mathbf{e}_{\text{r}} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

De matrix \mathbf{G} bevat de afgeleiden van de survey data, \mathbf{R} de ruimtelijke afhankelijkheden. De vector $\delta \mathbf{m}_{\text{true}}$ is het verschil tussen het correcte model en een arbitrair referentiemodel, $\delta \mathbf{d}_{\text{obs}}$ is het verschil tussen de metingen en het referentiemodel, \mathbf{e}_{obs} bevat de fout op de metingen, $\delta \mathbf{r}$ zijn de constraints en \mathbf{e}_{r} is de fout op de constraints. De ruimtelijke afhankelijkheid tussen meetpunten op een vlieglijn en meetpunten op een andere vlieglijn wordt bepaald door Delauney triangulatie. Hierbij wordt voor elk punt gezocht naar de dichtstbij gelegen andere punten.

De gekozen parameters voor de toegepaste SCI (Tabel 6.1) zijn gebaseerd op expertkennis, en vergelijking van inversieresultaten voor een klein representatief deelgebied. De verschillende deelgebieden zijn onafhankelijk van elkaar geïnverteerd. De inversieresultaten zijn tenslotte visueel gecontroleerd op grote afwijkingen tussen de metingen en de inversiemodelresultaten (zie voorbeeld Figuur 6.1).

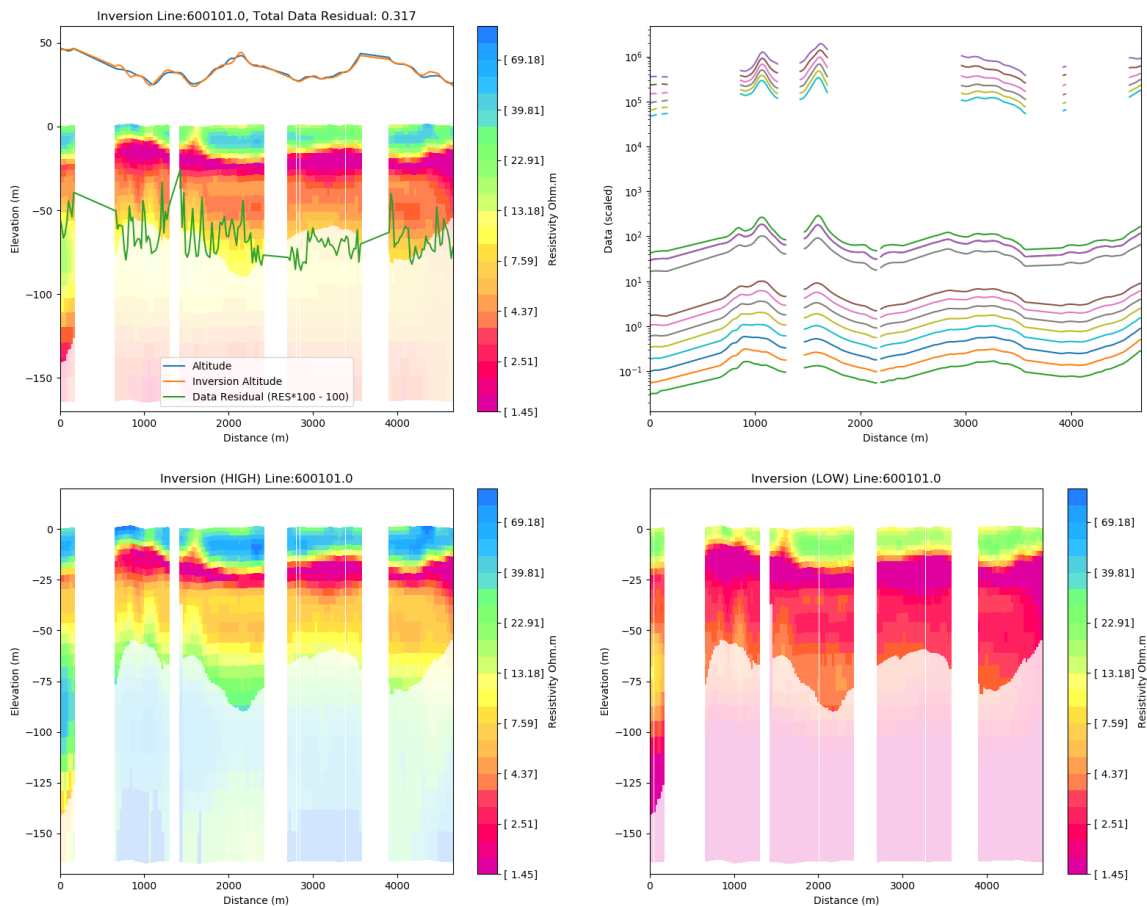
Tabel 6.1 Gehanteerde inversieparameters.

Parameter	Waarde
Altitude a-priori STD	3
Altitude lateral constraint STD	1.3
SCI section length	2000 [aantal meetpunten]
Max sounding gap	300 m
Reference distance	35 m
Minimum number data points	5
Vertical constraints, resistivities	2
Horizontal constraints, resistivities	1.3
Auto scaling power	0.75

In de inversie zijn dertig lagen gehanteerd. De verticale laagindeling is een vaststaand gegeven in de inversie. Laagdikten nemen exponentieel toe met de diepte, en zijn een compromis tussen ondiep detail en verlies van detaillering op grotere diepten (Tabel 6.2).

Tabel 6.2 Gehanteerde laagindeling in de inversie.

laag nummer	laagdikte (m)	onderkant laag (m t.o.v. maaiveld)
1	2.0	2.0
2	2.1	4.1
3	2.3	6.4
4	2.4	8.8
5	2.5	11.3
6	2.7	14.0
7	2.9	16.9
8	3.0	19.9
9	3.2	23.1
10	3.4	26.5
11	3.6	30.1
12	3.8	33.9
13	4.1	38.0
14	4.3	42.3
15	4.6	46.9
16	4.9	51.8
17	5.2	57.0
18	5.5	62.5
19	5.8	68.3
20	6.2	74.5
21	6.5	81.0
22	6.9	87.9
23	7.4	95.3
24	7.8	103.1
25	8.3	111.4
26	8.8	120.2
27	9.3	129.5
28	9.9	139.4
29	10.5	149.9
30	∞	∞



Figuur 6.1 Voorbeeld error-analyse van de inversieresultaten. Visuele controle vindt plaats op de residuen (groene lijn, linksboven), vreemde patronen in de data langs een vlieglijn (rechtsboven), en de verschillen tussen de boven- (linksonder) en ondergrens (rechtsonder) van het confidence interval rond het inversieresultaat (90% zeker dat resultaat zich binnen deze bandbreedte bevindt). De witgemaakte onderkant van de panelen linksboven, en links- en rechtsonder geeft de berekende 'depth-of-investigation' (DOI) weer, dit is de dieptegrens waaronder geen betekenisvolle resultaten kunnen worden bepaald.

6.4 Oostelijk kustgebied

De inversieresultaten van het deelgebied Oostelijk kustgebied zijn zonder aanpassingen overgenomen uit Schaars, 2014. Dit deelgebied is met dezelfde inversietechniek geïnverteerd, zij het met enigszins andere keuzen voor de verschillende inversieparameters. Voor meer informatie wordt verwezen naar Schaars (2014).

6.5 Resultaten

Resultaat van de inversieprocedure is de bulk resistiviteit (reciproke van de bulk geleidbaarheid) voor de 30 inversielagen op elk meetpunt op elke vlieglijn in het studiegebied. Deze gegevens zijn alleen betekenisvol (en worden verder alleen gebruikt) tot aan de 'depth-of-investigation' (DOI). De DOI wordt numeriek bepaald en is de diepte waaronder de resistiviteit van het inversiemodel geen enkele weerslag meer heeft op de residuen (de fit van het inversiemodel met de gemeten data). Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 10.1b.

7 Afleiden geleidbaarheid grondwater

7.1 Introductie

De geïnverteerde AEM resultaten geven de *bulk* geleidbaarheid van de ondergrond. Deze bulk geleidbaarheid wordt bepaald door zowel de geleidbaarheid van het grondwater (de parameter waar we in deze studie met name naar op zoek zijn) als door bodemeigenschappen (porositeit en kleigehalte). Om een inschatting te maken van de geleidbaarheid van het grondwater zullen we daarom de geleidbaarheid van het grondwater moeten afleiden uit de bulk geleidbaarheid.

Dit hoofdstuk beschrijft eerst de algemene theorie van de geleidbaarheid van de ondergrond. Vervolgens worden twee aanpakken beschreven om grondwatergeleidbaarheid af te leiden uit bulk geleidbaarheid. De eerste aanpak (FRESHEM methode) is gestoeld op lokale metingen van zowel bulk geleidbaarheid als grondwatergeleidbaarheid en probeert uit deze metingen algemeen geldende relaties af te leiden. De tweede aanpak is gebaseerd op lokale expertkennis van de Universiteit Gent, aangepast op basis van AEM en grondmetingen. Als uitkomst van een werksessie met betrokken experts is de tweede aanpak uiteindelijk toegepast in dit project.

7.2 Theorie en terminologie

Een geo-elektrische of elektromagnetische meting (AEM, of bijvoorbeeld een boorgatmeting) meet de totale (bulk) geleidbaarheid (of haar reciproke, resistiviteit) van de bodemdeeltjes en het poriewater. In zandige sediment(gesteent)en is de geleidbaarheid door uitwisseling aan de oppervlakte van de bodemdeeltjes (oppervlaktegeleidbaarheid) te verwaarlozen. Archie (1942) vond voor zandige sediment(gesteent)en de volgende lineaire relatie:

$$R_b = F \cdot R_w, \quad (7.1)$$

met daarin R_b de bulk resistiviteit, F de zogeheten formatiefactor en R_w poriewater resistiviteit. Of, uitgedrukt in geleidbaarheden:

$$EC_b = \frac{1}{F} EC_w, \quad (7.2)$$

met EC_b de bulk geleidbaarheid en EC_w de geleidbaarheid van het poriewater. De formatiefactor F bleek vrij constant per lithologie en af te hangen van de porositeit n , volgens (Archie, 1942):

$$F = \frac{1}{n^m}, \quad (7.3)$$

met m als de cementatiefactor (een kalibratieparameter, met voor ongeconsolideerde sedimenten waarden rond de 1.3). Immers, de porositeit bepaalt direct het aandeel geleidend water in de ondergrond.

Echter, in het geval van kleiige of veenrijke sedimenten, draagt ook de oppervlaktegeleidbaarheid bij aan de bulk geleidbaarheid van de ondergrond. Dit heeft te

maken met ionenuitwisseling met de elektrische dubbellaag van kleimineralen. De geleiding via zowel het poriewater als via de oppervlakte van kleimineralen kun je je voorstellen als een elektrische parallelschakeling (Figuur 7.1). Met EC_s als de oppervlaktegeleidbaarheid geldt (Revil et al., 2012; Waxman and Smits, 1968):

$$EC_b = \frac{1}{F} \cdot EC_w + EC_s \quad (7.4)$$

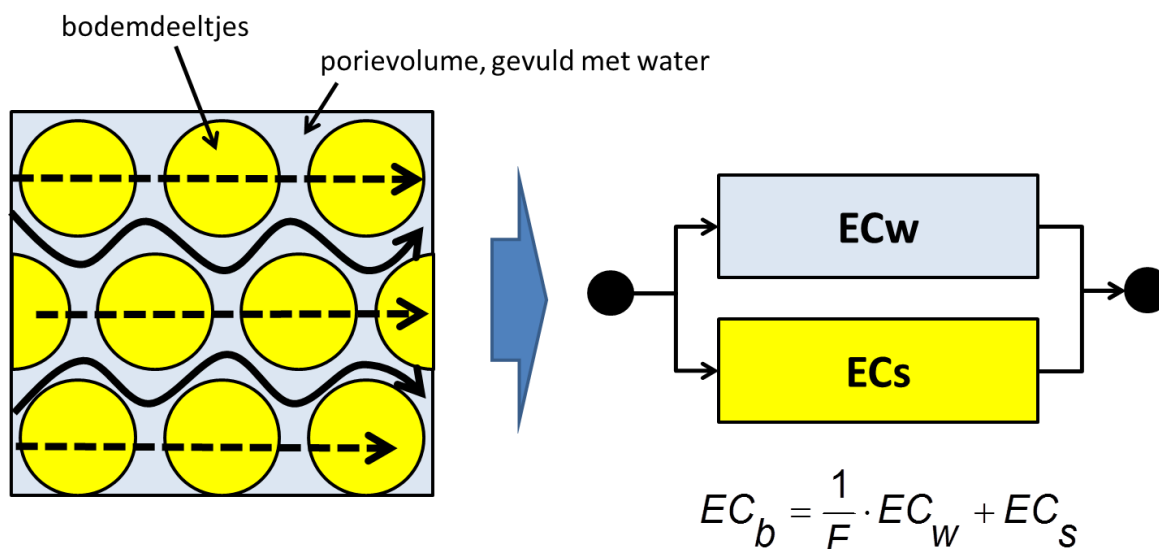
Of uitgedrukt in resistiviteiten (Patnode & Wyllie, 1950):

$$\frac{1}{R_b} = \frac{1}{F \cdot R_w} + \frac{1}{R_{mat}} \quad (7.5)$$

met R_{mat} de matrix resistiviteit.

De vaste waarde in deze formule voor de oppervlaktegeleidbaarheid is een sterke vereenvoudiging van de niet-lineaire relatie tussen de oppervlaktegeleidbaarheid en de geleidbaarheid van het poriewater. In werkelijkheid neemt de oppervlaktegeleidbaarheid af bij een lage geleidbaarheid van het poriewater (Revil and Glover, 1998). Immers, zonder ionen in het poriewater is er ook geen uitwisseling mogelijk met de elektrische dubbellaag rondom de kleimineralen. Pas vanaf een poriewater geleidbaarheid van zo'n 2 mS/cm (2000 μ S/cm) is de oppervlaktegeleidbaarheid onafhankelijk van de poriewatergeleidbaarheid.

Er moet worden opgelet dat bij een onverzadigde bodem een deel van het porievolume wordt ingenomen door niet-geleidende lucht, en de geleidbaarheid evenredig afneemt. In de beschrijving in dit hoofdstuk wordt steeds uitgegaan van een volledig verzadigde bodem.



Figuur 7.1 Elektrische geleiding van de ondergrond is op te vatten als een elektrische parallelschakeling, bestaande uit de elektrische geleiding van het poriewater EC_w en de oppervlaktegeleidbaarheid (EC_s).

Wanneer de formatiefactor en de oppervlaktegeleidbaarheid bekend zijn kan, na omschrijven van vergelijking 5.3, de geleidbaarheid van het grondwater worden berekend als:

$$EC_w = F \cdot (EC_b - EC_s) \quad (7.5)$$

Deze laatste relatie is in dit onderzoek toegepast voor alle lithoklassen. Zoals blijkt uit vergelijking 7.5 speelt de oppervlaktegeleidbaarheid een grotere rol bij een lagere geleidbaarheid van het poriewater.

7.3 Eerste aanpak: FRESHEM Zeeland methode toegepast voor Vlaanderen

Voor het omrekenen van bulkresistiviteit naar de chlorideconcentratie van het grondwater zijn in FRESHEM Zeeland per lithologische klasse lineaire relaties afgeleid tussen bulk geleidbaarheid (reciproke van resistiviteit) en de geleidbaarheid van het grondwater. Deze relaties zijn afgeleid door 71 grondmonsters te steken en deze in het laboratorium te onderzoeken. Hierbij zijn de monsters verzadigd met verschillende concentraties van bekende watergeleidbaarheid en is de bulk geleidbaarheid gemeten. Zo kon per monster, en uiteindelijk per lithologische klasse, de waarden van de formatiefactor en de oppervlakte-geleidbaarheid vastgesteld worden. Opvallend hierbij was een grote invloed van oppervlaktegeleidbaarheid, zowel zoals verwacht in de kleiïge afzettingen als in de zandige afzettingen (Revil et al., 2017). Deze waarden zijn vervolgens gebruikt om de met de helikopter (AEM) gemeten bulk resistiviteit om te zetten naar een chlorideconcentratie van het grondwater. Details over deze procedure zijn te vinden in Revil et al. (2017), Delsman et al. (2018) en Van Baaren et al. (2018).

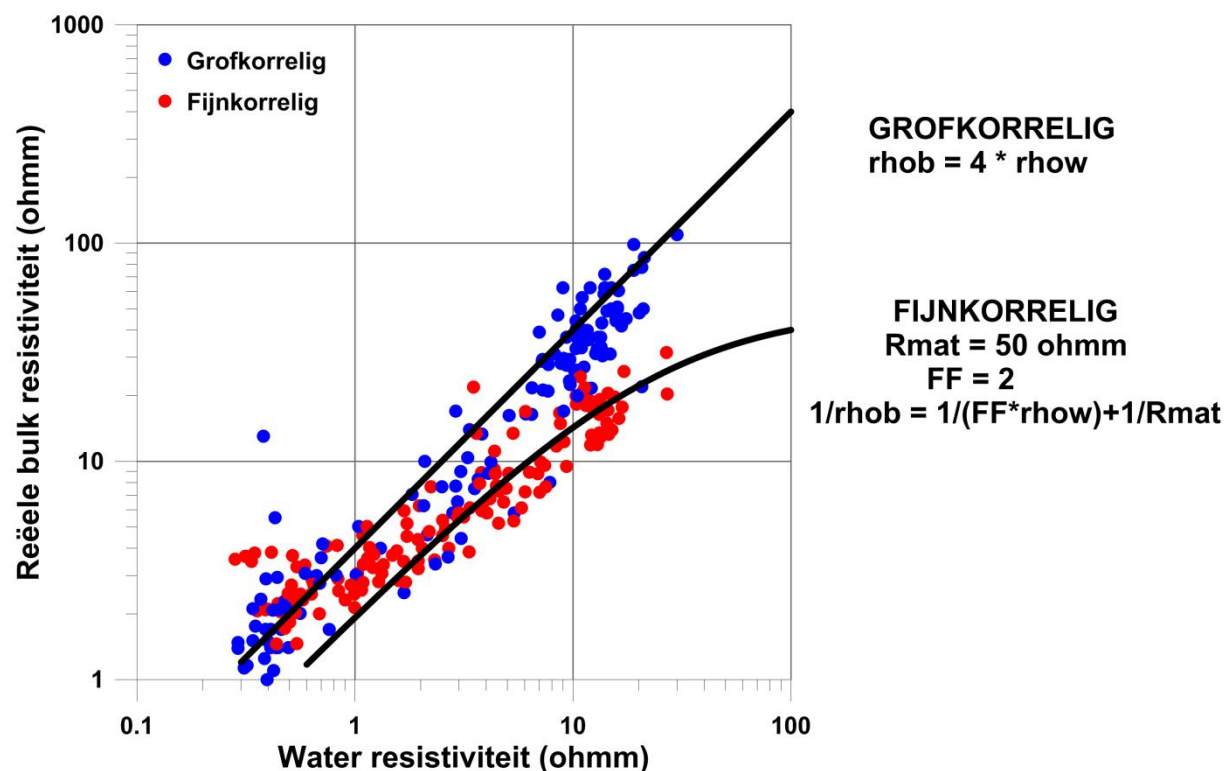
In Vlaanderen kon deze procedure niet één-op-één worden overgenomen. Ten eerste is de informatie over de lithologische opbouw van de ondiepe ondergrond in Vlaanderen niet zo gedetailleerd beschikbaar als in Zeeland (Stafleu et al., 2011) en ten tweede is er geen meetcampagne uitgevoerd om ook voor Vlaamse sedimenten waarden voor de formatiefactor en oppervlakte-geleidbaarheid in het laboratorium vast te stellen. Wel beschikbaar was een database (280 datapunten) van de Universiteit Gent – LTGH met gecombineerde metingen van de bulk resistiviteit R_b en de resistiviteit van het poriewater R_w voor verschillende lithologieën. De precieze herkomst van deze metingen was niet langer te achterhalen. Het is daarom ook niet bekend wat de precieze lithologie en stratigrafie is van elke meting, alleen of het om zandige of kleiïge afzettingen gaat. De dataset bevat zowel Tertiaire als Quartaire afzettingen. Waar bekend was dat het om kleiïge Tertiaire monsters ging, zijn deze uit de dataset verwijderd.

Er is uitgebreid onderzocht of en hoe vanuit deze dataset waarden voor de formatiefactor en oppervlaktegeleidbaarheid konden worden afgeleid. Verslaggeving van dit onderzoek is opgenomen als appendix B. Samenvattend zijn de beschikbare metingen eerst uitgesplitst naar kleiïge of zandige afzettingen. Voor verder onderscheid tussen lithologieën ontbraken de meetgegevens. Tevens is de resolutie van het lithologisch model onvoldoende om verder onderscheid te maken. Voor de omzetting van bulk resistiviteit naar grondwatergeleidbaarheid gaan we uit van het eerder beschreven vereenvoudigde model van parallelle geleiders (Figuur 7.1). Daarbij is onderzocht hoe het voor het afleiden van formatiefactor en oppervlaktegeleidbaarheid verschilt of wordt gewerkt in geleidbaarheden of resistiviteiten. Hoewel de formules identiek zijn, wordt bij lineaire regressie meer gewicht toegekend aan de grotere verschillen, vaak behorend bij de grotere waarden. In het geval van geleidbaarheden zijn dit juist de zoutere monsters; in het geval van resistiviteiten juist de zoetere. Het gekozen lineaire model is voor zoutere monsters meer accuraat, waardoor is geconcludeerd dat lineaire regressie beter op geleidbaarheden kan worden toegepast dan op resistiviteiten.

Bij lineaire regressie op basis van alle metingen uit de UGent-LTGH dataset, bleek een grote invloed van de vele zoete monsters. Door de grote hoeveelheid zoete monsters (waarvoor het toegepast lineaire model eigenlijk niet geldig is), werden relatief lage formatiefactoren en oppervlaktegeleidbaarheden verkregen. De oververtegenwoordiging van zoete monsters is op twee manieren tegengegaan: (1) door de oppervlaktegeleidbaarheid vast te zetten op waarden verkregen in Zeeland, en (2) door monsters met een geleidbaarheid < 2 mS/cm uit de dataset te verwijderen. Beide methodes werkten. Vervolgens is de regressie meer robuust gemaakt door ook de dataset van De Louw (2011) uit Zeeland toe te voegen. Met uitzondering van de eerste manier, waarbij ook de zoete monsters zijn meegenomen, presteren de verschillende methoden nagenoeg gelijk in vergelijking met gemeten grondwateranalyses. Vergeleken met gemeten grondwateranalyses gaf deze methode goede resultaten. Zie voor details appendix B. Op basis van expertkennis en vergelijking op de referentieprofielen is echter gekozen voor de tweede aanpak.

7.4 Tweede aanpak: Toepassing expertkennis en relatie AEM - grondmetingen

Het LTGH van Universiteit Gent heeft veel ervaring in het Belgisch kustgebied, en heeft veel veldgegevens verzameld. Op grond hiervan werd, voor zandige afzettingen, de wet van Archie met formatiefactor 4 als een praktische gemiddelde relatie afgeleid (Walraevens et al, 1994) (Figuur 7.2). Zeuwts (1991) leidde een gemiddelde formatiefactor van 2 af voor fijnkorrelige afzettingen. Vlieghe (1994) vond voor dezelfde monsters een matrixresistiviteit R_{mat} van 50.7 Ωm .



Figuur 7.2 Bilogaritmische plot van in geofysische loggings gemeten bulkresistiviteiten versus grondwaterresistiviteiten voor grofkorrelige en fijnkorrelige afzettingen en de gebruikte omrekeningsfuncties voor grof- en fijnkorrelige afzettingen

Deze relaties zijn vervolgens vergeleken met paren van met AEM gemeten resistiviteit en de op grondwatermonsters gemeten EC_w waarde voor grondwaterstalen gemeten in peilbuizen

nabij (< 50m) de vlieglijnen. Dit is apart gedaan voor grofkorrelige en fijnkorrelige afzettingen, gebaseerd op het opgestelde lithologische model. Empirische parameterwaarden werden bepaald door gemeten en berekende EC_w waarden te vergelijken en de parameters aan te passen totdat de regressielijn een helling van 1:1 benaderde (Figuur 7.3).

Grofkorrelige afzettingen (overwegend zandfacies)

Voor grofkorrelige afzettingen wordt een lineaire relatie tussen EC_w en de gemeten resistiviteit R_{AEM} aangenomen:

$$EC_w = F' \frac{1}{R_{AEM}}, \quad (7.6)$$

waarbij R_{AEM} de uit de AEM bekomen resistiviteit is.

Voor 70 datapunten (Figuur 7.3, links) (de punten nabij de vlieglijnen en in grofkorrelige afzettingen volgens het lithologisch model) geeft een evenredigheidsfactor van 2.75 tussen gemeten EC_w (op grondwater) en EC_b (afgeleid uit de AEM survey) een overeenkomst die dicht bij de 1:1 lijn ligt. De waarde van 2.75 kent een duidelijke onzekerheid (spreiding in Figuur 7.3 links), en wijkt af van de met behulp van grondmetingen bepaalde factor 4. Dit heeft te maken met de middeling van de met AEM gemeten bulk resistiviteit over een groter volume, de onzekerheid over de aanwezige lithologie volgens het opgestelde lithologisch model, en de variërende kleifractie in de ondergrond.

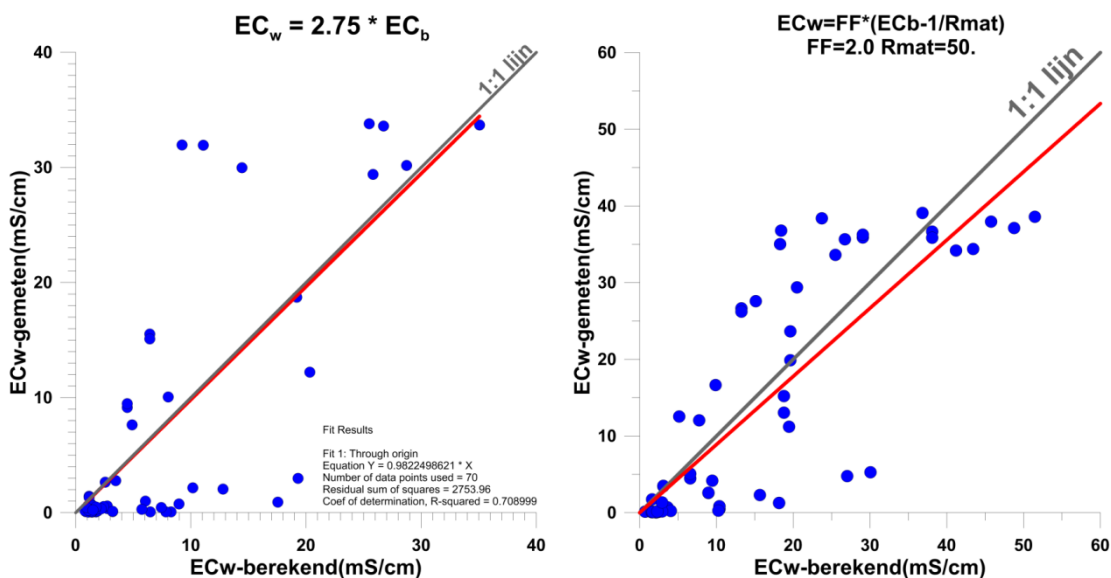
Fijnkorrelige afzettingen (overwegend kleifacies)

Voor fijnkorrelige afzettingen wordt de volgende formule gebruikt:

$$EC_w = F' \left(\frac{1}{R_{AEM}} - \frac{1}{R_{mat}} \right), \quad (7.7)$$

met $F' = 2.$, en $R_{mat} = 50$ Ohmm.

Deze door Zeuwts (1991) en Vlieghe (1994) afgeleide relatie levert een visueel aanvaardbare gelijkensis met de 1:1 lijn (Figuur 7.3, rechts). Bij de fijnkorrelige afzettingen gelden dezelfde kanttekeningen als bij de grofkorrelige afzettingen. Het is niet bekend waarom de F' hier minder afwijkt van de met grondmetingen bepaalde standaardrelatie als bij de zandige afzettingen.



Figuur 7.3 Bilineaire crossplot van gemeten versus uit AEM bulkresistiviteiten omgerekende EC_w waarden voor grofkorrelige texturen (links) en fijnkorrelige texturen (rechts)

Op basis van expertkennis en vergelijking op de referentieprofielen is ervoor gekozen deze aanpak verder in het project toe te passen. Dit betekent dat voor grofkorrelige afzettingen een formatiefactor van 2.75 is gehanteerd voor de omzetting van bulk resistiviteit naar grondwater geleidbaarheid, matrixresistiviteit wordt voor grofkorrelige afzettingen niet toegepast. Voor fijnkorrelige afzettingen wordt een formatiefactor van 2.0 en een matrixresistiviteit van 50 Ohm toegepast.

7.5 Tertiaire afzettingen

Ofschoon de focus van deze studie ligt op de ondiepe, Quartaire afzettingen, is tijdens de AEM survey tot in Tertiaire afzettingen gemeten. Er waren te weinig grondwatermonsters beschikbaar in met name de Tertiaire kleien om op basis hiervan relaties af te leiden tussen bulk geleidbaarheid en grondwatergeleidbaarheid. Voor de Tertiaire kleien is daarom op basis van de verwachte lage porositeit een formatiefactor van 8 ingeschat, en geen oppervlaktegeleidbaarheid. De Tertiaire zandige afzettingen zijn gelijk gehouden aan de Quartaire grofkorrelige afzettingen.

7.6 Resultaat

De stap is uitgevoerd voor alle vijf de deelgebieden, dus inclusief de gegevens voor het Oostelijk kustgebied (Schaars, 2014). Resultaat van deze stap zijn verticale profielen van grondwater geleidbaarheid langsheen de vlieglijnen. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 10.1a.

8 3D interpolatie van grondwatergeleidbaarheid

8.1 Inleiding

Vanuit het 2D resultaat is de EC_w afgeleid op locaties van de vlieglijnen. Op basis van deze gegevens kan door interpolatie een inschatting gemaakt worden van de meest waarschijnlijke EC_w op locaties waar geen metingen voorhanden zijn. Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van een 3D model waarin de ondergrond is opgedeeld in voxels van $50 \times 50 \text{ m}^2$ horizontaal, en 0.5 m verticaal. Na interpolatie van de gegevens uit het 2D resultaat is voor elke voxel binnen de modelbegrenzing een inschatting beschikbaar van de meest waarschijnlijke EC_w .

8.2 Gebruikte data

De data die als input dient voor het 3D model is het 2D resultaat van de vijf deelgebieden: Westelijk kustgebied, Centraal kustgebied, Oostelijk kustgebied, Meetjesland en Linker Scheldeoever. In het deelgebied Westelijk Kustgebied zijn ook de resultaten van de binnen dit project uitgevoerde SlimFlex metingen in peilbuizen 3-0077, 3-0513b en 3-0518b meegenomen in de interpolatie.

8.3 Resampling data op vlieglijnen

Het 2D resultaat bevat data voor alle vlieglijnen, waar met een onderlinge horizontale afstand van enkele tientallen meters een EC_w waarde is berekend voor 30 afzonderlijke lagen. De dikte van de lagen varieert van 2 m tot enkele meters (Tabel 6.2). Om deze grote hoeveelheid data beter hanteerbaar te maken is de data geresampled. Hierbij is voor elke voxel de mediaan van de in de voxel voorkomende EC_w waardes berekend. Deze resampling is nodig om:

- Het zogenaamde string-effect (Deutsch, 1994) te voorkomen. Bij datasets waarbij de metingen voorkomen op een lijn, kan Kriging interpolatie een onevenredig groot gewicht toekennen aan metingen aan de rand van de zoekstraal. Resampling maakt dit effect ongedaan.
- De rekentijd van interpolatie te verlagen.
- Een juist gewicht te geven aan lagen met verschillende diktes. Lagen die dikker zijn dan 0.5 m zullen invloed hebben in meerdere voxels, waardoor deze bij interpolatie een groter gewicht krijgen ten opzichte van dunnere lagen.

8.4 Modelbegrenzing

Lateraal

Extrapolatie van EC_w van het 2D resultaat zal een steeds minder realistisch resultaat geven naarmate de afstand tot de vlieglijnen groter wordt. Er is voor gekozen om EC_w in het 3D model te berekenen tot een maximale horizontale afstand van 300 m van de vlieglijnen. Dit heeft als gevolg dat op die locaties waar individuele vlieglijnen verder dan 600 m uit elkaar liggen, bijvoorbeeld rond bebouwd gebied of langs hoogspanningskabels, er 'gaten' zullen ontstaan in het 3D model.

Onderkant

In het 2D resultaat is de EC_w berekend tot een maximale diepte, zijnde de DOI. De diepte van de DOI varieert per meting. De maximale diepte van het 3D model is bepaald door een Inverse Distance Weighted (IDW) interpolatie van de DOI zoals gegeven op de individuele meetlocaties van het 2D resultaat.

Bovenkant

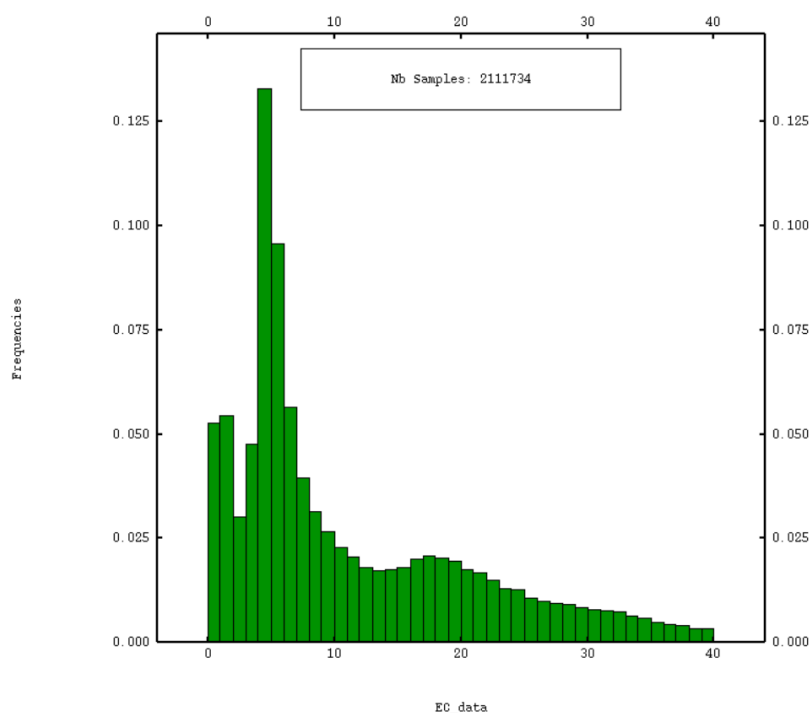
De bovenste laag in het 2D resultaat begint op het maaiveldniveau. De begrenzing van de bovenkant van het 3D model volgt dit niveau, en is bepaald door een IDW interpolatie van het niveau van de bovenkant van de eerste laag in het 2D resultaat zoals bekend op elke metinglocatie.

8.5 Interpolatie techniek

8.5.1 Indicator Kriging

Voor interpolatie van ruimtelijke data wordt vaak gebruik gemaakt van de kriging techniek. Bij kriging wordt de ruimtelijke correlatie van de data beschreven met een semivariogram model. Voor de inschatting van de EC_w op een locatie wordt vervolgens een gewicht toegekend aan alle datapunten die binnen een zoekgebied van de te schatten locatie liggen. Behalve de definitie van het semivariogram model, is dus ook de gekozen grootte en vorm van het zoekgebied van belang. De achtergrond van kriging interpolatie is te vinden in standaard geostatistische naslagwerken, zoals Isaaks and Srivastava (1989) en Goovaerts (2006).

EC_w waardes van het 2D resultaat vertonen een scheve, bimodale verdeling (zie Figuur 8.1). Na interpolatie zal er een zekere mate van uitmiddeling van waardes plaats hebben gevonden, waardoor de hoeveelheid 'brakke' waardes overschat kunnen worden in het 3D model ten opzichte van het 2D resultaat. Om deze middeling van waardes te minimaliseren is er voor gekozen om de Kriging variant Indicator Kriging toe te passen: een methode die toepasbaar is voor interpolatie waar data niet normaal verdeeld is. Hierbij wordt voor elk datapunt de positie (hoger of lager) ten opzichte van een aantal klassegrenzen bepaald (de indicator waardes). Na het uitvoeren van een aparte kriging interpolatie voor elke indicator wordt de kans berekend op het overschrijden van elke klassegrens. De EC_w op een locatie wordt dan beschreven door een discrete kansdichtheidsverdeling, waarbij de meest waarschijnlijke EC_w gevonden wordt door de mediaan van deze verdeling te bepalen. De klassegrenzen 1, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 6, 7, 10, 15 en 25 mS/cm zijn gebruikt als indicators.



Figuur 8.1 Histogram van EC_w van geresamplede data van deelgebied Oostelijk kustgebied.

8.5.2 Het zoekgebied

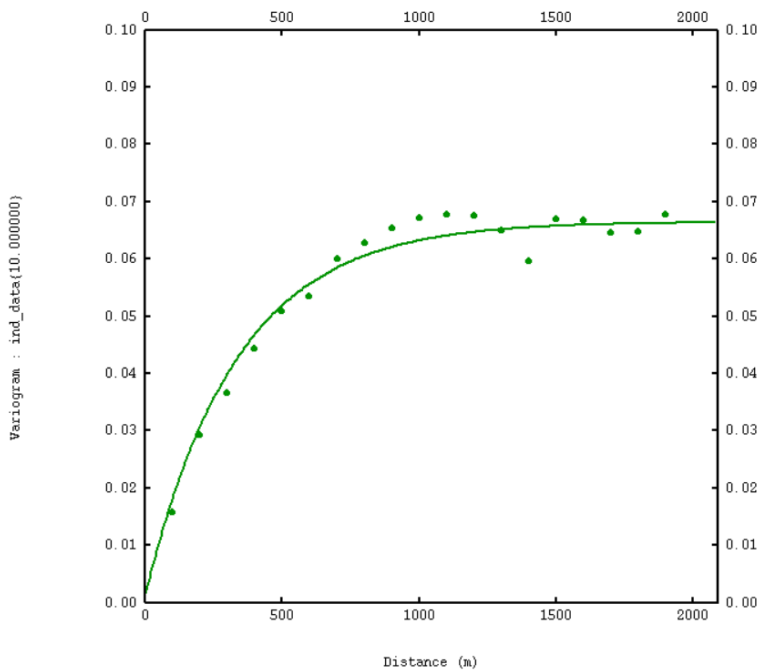
Het zoekgebied definieert het aantal en de spreiding van de metingen die worden meegenomen voor de schatting van de EC_w waarde van een individuele voxel. Uit de geresamplede data worden steeds 16 datapunten geëvalueerd: een aantal waarin een balans is gezocht tussen nauwkeurigheid van het geïnterpoleerde resultaat en rekentijd. De 16 datapunten zijn verdeeld over 4 sectoren waarbij in elke sector de 4 dichtstbijzijnde datapunten worden geselecteerd. EC_w waarden worden op deze manier altijd berekend op basis van ten minstens de twee dichtstbijzijnde vlieglijnen. De vorm en oriëntatie van het zoekgebied is afhankelijk gemaakt van de lokale anisotropie, zie paragraaf 8.5.4.

8.5.3 Het semivariogram model

Het gewicht dat datapunten meekrijgen bij interpolatie is onder andere afhankelijk van de afstand tot de te schatten locatie. De mate waarin verder weg gelegen punten invloed hebben wordt vastgelegd in een semivariogram model. De data wordt gebruikt om een experimenteel semivariogram te berekenen, gebaseerd op verschil tussen metingen die gescheiden worden door een bepaalde afstand:

$$\hat{\gamma}(\bar{d}_j) = \frac{1}{2N_j} \sum_{i=1}^{N_j} ((s_i - (s_i + d)))^2, \forall (s_i, s_i + d) : h \in [d, d_j + \delta], \quad (8.1)$$

met daarin d als de onderlinge afstand tussen twee metingen, d_j de minimale afstand tussen twee punten in klasse j , δ de klasse grootte, N_j het aantal datapunten in klasse j .

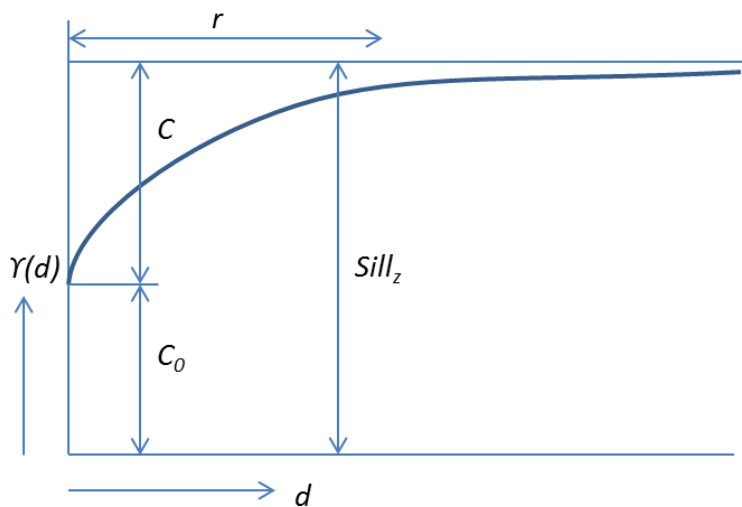


Figuur 8.2 Experimenteel semivariogram (groene punten) en het gefitte exponentiële semivariogram model (groene lijn), met een range van 1000 m, voor de indicator 10 mS/cm van het deelgebied Linker Scheldeoever. Onderlinge afstand tussen twee metingen op de x-as; berekende waarde van het variogram op de y-as (grotere waarde betekent minder correlatie tussen twee metingen).

Het experimenteel semivariogram van de 10 mS/cm indicator, data uit het deelgebied Linker Scheldeoever, is als voorbeeld gegeven in Figuur 8.2. De ruimtelijke correlatie van de data wordt gekwantificeerd door het semivariogram model. Een exponentieel model met nugget geeft de grootste overeenkomst met het experimenteel semivariogram, waarbij de semivariogram waarde $\gamma(d)$ is gedefinieerd als:

$$\gamma(d) = C_0 + C \left(1 - e^{\left(\frac{-d}{r} \right)} \right), \quad (8.2)$$

met de nugget C_0 , de sill C en de range r (zie ook Figuur 8.3). De nugget staat voor de variabiliteit van de data waarvan een deel te wijten kan zijn aan meetfouten, de sill is de maximale variabiliteit tussen twee punten onderling en de range is de afstand vanaf wanneer punten onderling niet meer ruimtelijk gecorreleerd zijn.



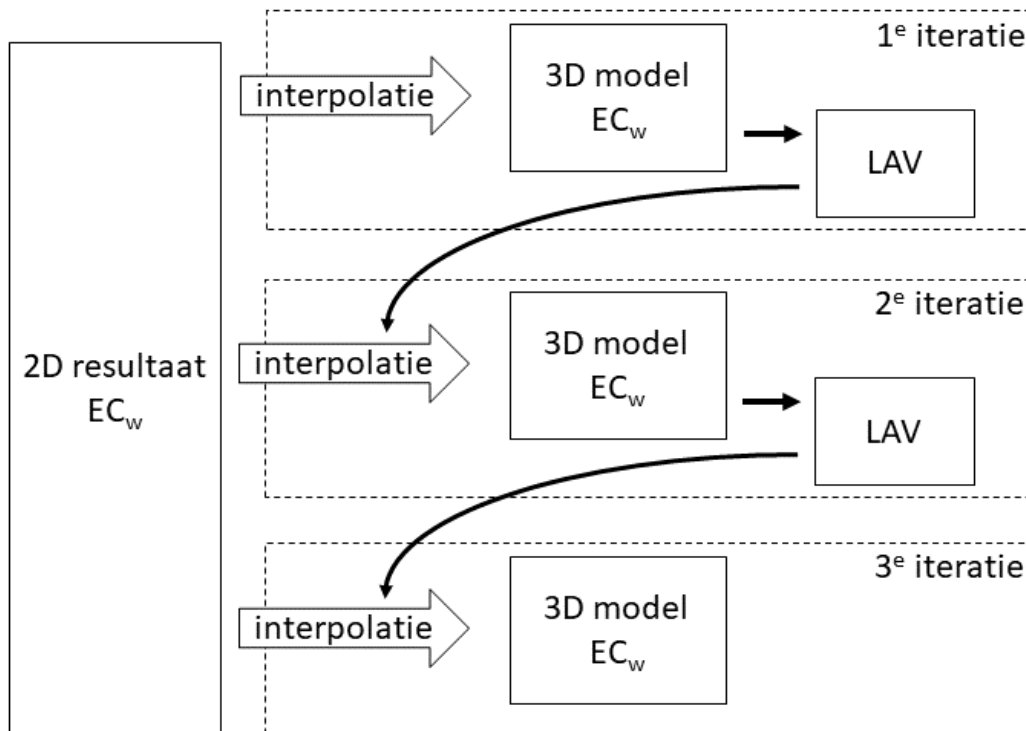
Figuur 8.3 Betekenis van de nugget (C_0), sill (C), en de range (r) in een semivariogram model.

De nugget en sill van het exponentiele semivariogram model zijn zonder aanpassing gebruikt bij de kriging interpolatie. Voor de range, de afstand waar geen ruimtelijke correlatie van de data meer wordt verwacht, is 1000 m bepaald uit het experimentele semivariogram. Deze waarde is gebruikt als de maximale range van een anisotroop semivariogram model, zie verder paragraaf 8.5.4.

8.5.4 Lokale anisotropie veld

Interpolatie kan zorgen voor een zekere mate van vereenvoudiging ten opzichte van de originele data. Hierdoor kunnen kleine/smalle structuren minder goed in het 3D model terecht komen dan verwacht op basis van het 2D resultaat. Kreekruggen zijn belangrijke elementen die de aanwezigheid van zoet grondwater kunnen sturen. Bij interpolatie van de EC_w onder deze langgerekte structuren kan het voorkomen dat in werkelijkheid continue structuren in het geïnterpoleerde resultaat onderbroken zijn. De ruimtelijke correlatie van zoet grondwater onder kreekruggen is groter parallel aan de paleo-stromingsrichting van de getijdekreeken dan in een richting haaks hierop. Er is dus sprake van een grote mate van anisotropie in deze systemen. Om het interpolatie resultaat te verbeteren is rekening gehouden met de richting en grootte van de anisotropie van de te interpoleren structuren. Deze werkwijze is in het FRESHEM Zeeland project ontwikkeld, voornamelijk om de berekende onzekerheid van het 3D model te verkleinen (Van Baaren et al., 2018; Delsman et al., 2018). Hoewel onzekerheid in het huidige project niet wordt uitgeleverd (het gaat hier namelijk maar om een onderdeel van de volledige onzekerheid), geeft interpolatie met anisotropie een meer plausibele 3D configuratie van de zoet water verdeling onder met name kreekruggen en is om die reden ook in het huidige project toegepast.

Workflow interpolatie met anisotropie



Figuur 8.4 Workflow voor interpolatie met anisotropie. Na 2 iteraties van interpolatie vervolgens bepalen van anisotropie parameters leidt een 3^e interpolatie tot het uiteindelijke 3D model van EC_w .

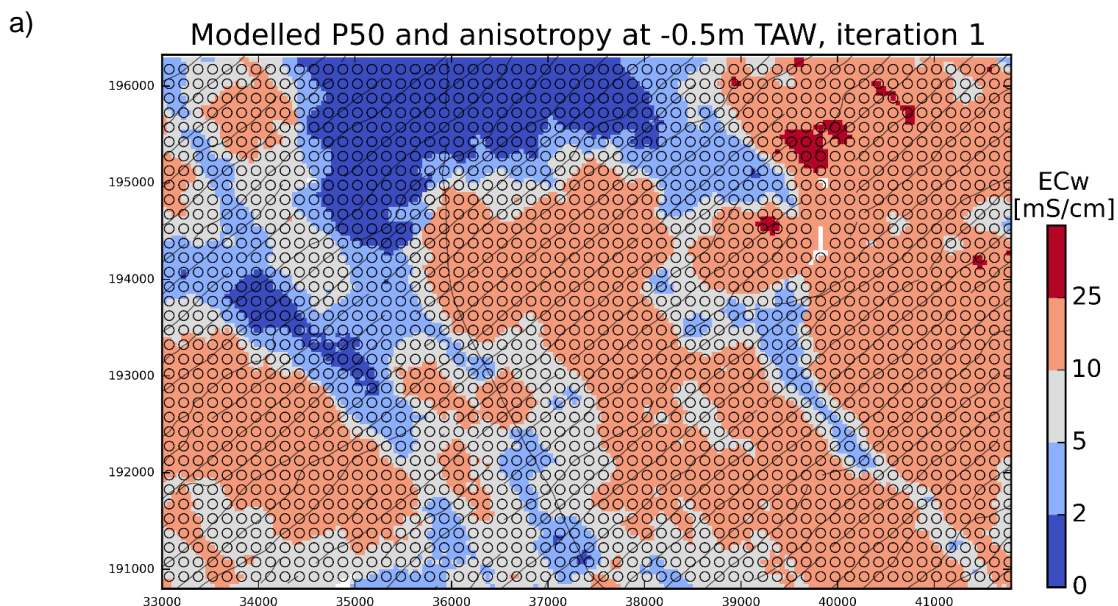
Anisotropie kan worden gekwantificeerd met parameters voor de magnitude (mate van afplatting van de anisotropie ellips) en de richting (oriëntatie van de lange as van de anisotropie ellips). Voordat een goede interpolatie met anisotropie kan worden uitgevoerd, zullen eerst de anisotropie parameters moeten worden vastgesteld voor iedere individuele voxel in het 3D model. De toegepaste werkwijze is gebaseerd op de methode van Te Stroet en Snepvangers (2005) waar in meerdere interpolatie iteraties een steeds betrouwbaarder inschatting van de anisotropie op lokale schaal kan worden gemaakt. Een zgn. lokaal anisotropie veld (LAV) is bepaald door eerst een 'normale' (isotrope) kriging interpolatie uit te voeren (zie Figuur 8.5a). Het hiermee verkregen 3D model wordt gebruikt voor het bepalen van de ligging en oriëntatie van de zoetwatervoorkomens, waaruit een LAV wordt geconstrueerd:

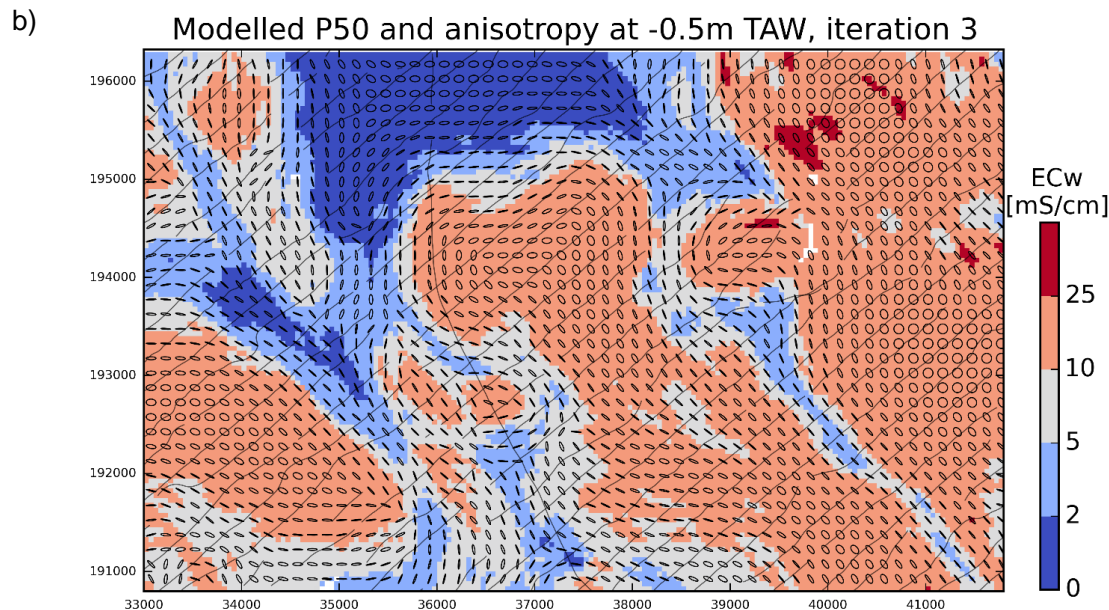
- *Anisotropie magnitude* wordt in het 3D model bepaald door in het horizontale vlak, voor iedere voxel de kortste afstand tot een klassegrens van 2 of 5 mS/cm te bepalen.
- De *anisotropie richting* wordt eerst bepaald voor iedere voxel waar een meting uit het 2D resultaat aanwezig is met een waarde <10 mS/cm. Deze is gelijk aan de richting van de maximale afstand in het 3D model waarin EC_w onder grenswaarde van 2 mS/cm blijft. Als geen afstand gevonden >1000m, herhalen voor grenswaardes 5 en vervolgens 10 mS/cm.
- Interpolatie van de gevonden *anisotropie richtingen* naar volledig 3D model door middel van IDW interpolatie.

Bij een tweede interpolatie wordt de kennis over anisotrope structuren meegenomen om een betere interpolatie te verkrijgen. Zowel het zoekgebied als het semivariogram model kunnen

nu worden weergegeven door een ellipsoïde, waarbij de mate van afplatting wordt gestuurd door de magnitude in het LAV en de oriëntatie van de lange as gelijk aan de lokale anisotropie richting (zie Figuur 8.5b). De anisotrope kriging interpolatie wordt berekend op basis van dezelfde EC_w waarden uit het 2D resultaat maar geeft een nieuw 3D model waarin de anisotrope structuren beter zijn gemodelleerd. Vanuit dit verbeterde 3D model kan opnieuw een LAV worden bepaald wat gebruikt kan worden voor een wederom verbeterde interpolatie. Na deze derde interpolatie wordt verondersteld dat er een optimum is bereikt en wordt er geen verbetering van het 3D model verwacht door toepassing van extra iteraties (zie paragraaf 8.6).

In Figuur 8.5 is het resultaat na interpolatie weergegeven voor een gedeelte van het modelgebied Westelijk kustgebied. Voor een horizontale doorsnede op -0.5 m TAW, zoals bereikt na de eerste (Figuur 8.5a) en derde iteratie (Figuur 8.5b), is de EC_w gevisualiseerd samen met het LAV zoals gebruikt voor de interpolatie. De derde iteratie geeft een wat grotere continuïteit van de smalle zoetwatervoorkomens dan de eerste iteratie, en de overgangen in enkele kritische gebieden zijn strakker gedefinieerd.

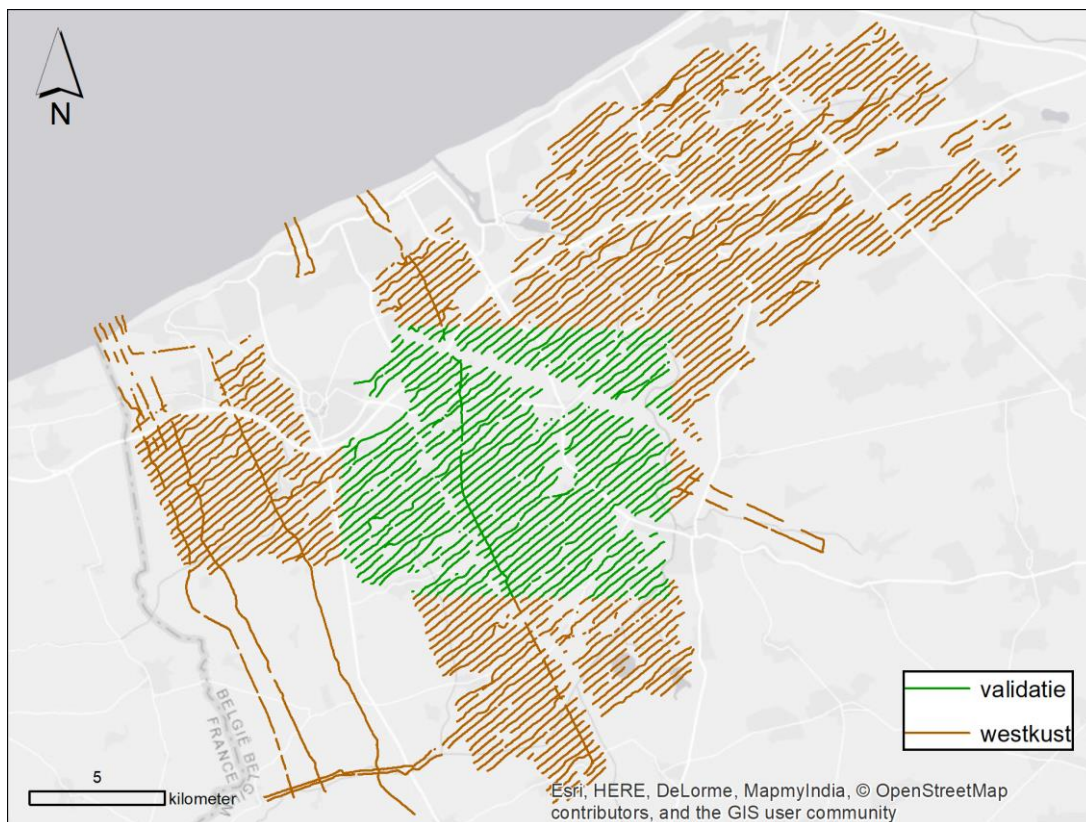




Figuur 8.5 EC_w van het 3D model, LAV gevisualiseerd als anisotropie ellipsen, vlieglijnen als zwarte lijnen, na de a) eerste iteratie en b) derde iteratie

8.6 Kruisvalidatie

Interpolatie resulteert in een meer waarschijnlijke EC_w klasse op locaties waar geen metingen voorhanden zijn. Deze voorspelling is uiteraard niet perfect. De nauwkeurigheid van de gebruikte interpolatiemethode is in het deelgebied Westelijk kustgebied (tussen X-coördinaat 31500 en 43700, Y-coördinaat 190000 en 200000, en binnen het dieptebereik tussen -10 en + 1 m ten opzichte van TAW, zie Figuur 8.6) geëvalueerd door middel van kruisvalidatie. Kruisvalidatie is per vlieglijn toegepast door de informatie van een enkele vlieglijn weg te laten en om vervolgens de EC_w te schatten voor elke voxel op deze vlieglijn op basis van de informatie van de overige vlieglijnen. Dit proces wordt herhaald voor elke beschikbare vlieglijn. Een kruisvalidatie verschil kan hierna worden berekend per voxel door de met interpolatie berekende EC_w klasse en de werkelijke EC_w klasse op deze vlieglijn met elkaar te vergelijken. Dit verschil geeft een maat voor de nauwkeurigheid van de voorspelling, maar is niet gelijk aan de onzekerheid van het 3D model. De met kruisvalidatie gevonden verschillen tussen geïnterpoleerde waarden en het 2D resultaat zijn (veel) groter dan de werkelijke verschillen die te verwachten zijn in het 3D model. Met een onderlinge afstand van 250 m tussen de vlieglijnen liggen de te schatten locaties bij kruisvalidatie rond de 250 m van de dichtstbijzijnde vlieglijn terwijl dit bij de normale interpolatie slechts tussen de 0 en 125 m is.

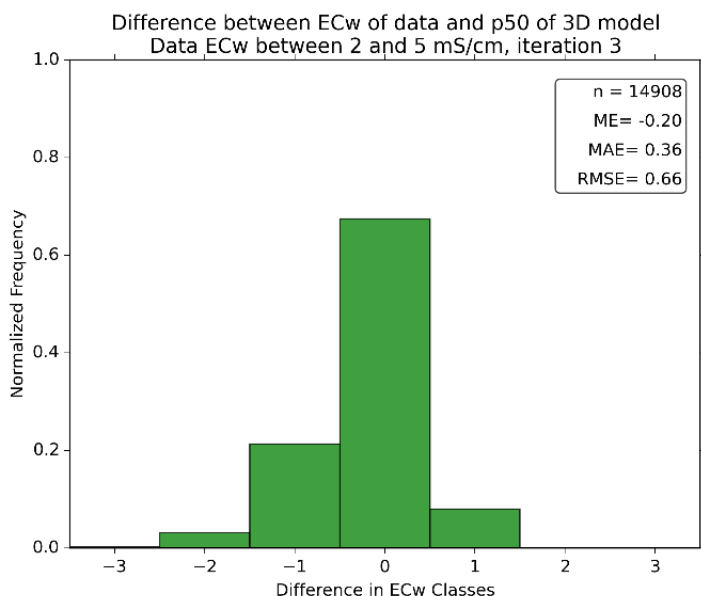


Figuur 8.6 Kruisvalidatie in het deelgebied Westelijk kustgebied. Groene lijnen geven de gedeeltes van de vlieglijnen weer die gebruikt zijn voor kruisvalidatie, binnen het dieptebereik van -10 tot +1 m ten opzichte van TAW.

In het gevalideerde gebied is een kruisvalidatie uitgevoerd voor alle voxels waarin zich een meting bevindt van het 2D resultaat. Een histogram van de kruisvalidatie resultaten (Figuur 8.7) laat de verdeling van het verschil in EC_w klassen zien tussen het 2D resultaat en de geïnterpoleerde waarden zoals verkregen met kruisvalidatie. Weergegeven zijn de voxels die zich in het 2D resultaat in de EC_w klasse tussen 2 en 5 mS/cm bevinden, en interpolatie uitgevoerd met een LAV zoals gebruikt bij iteratie 3. Het verschil tussen de EC_w zoals bekend uit het 2D resultaat en zoals berekend bij de kruisvalidatie kan worden samengevat met de mean absolute error (MAE) van de voorspelling, volgens:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Z}(s_i) - Z(s_i)|, \quad (8.3)$$

waarin Z de geschatte EC_w klasse in model ($\hat{Z}(s_i)$) of EC_w klasse in 2D resultaat ($Z(s_i)$) op locatie i , waarbij $0 \leq EC_w < 2$ waarde 0 krijgt, $2 \leq EC_w < 5$ waarde 1 krijgt, etc.



Figuur 8.7 Histogram van kruisvalidatie voor voxels die zich in het 2D resultaat in de EC_w klasse tussen 2 en 5 mS/cm bevinden, weergegeven als het aantal EC_w klassen verschil tussen het 2D resultaat en de schatting bij kruisvalidatie. De gebruikte klassen zijn: 0-2, 2-5, 5-10, 10-25 en > 25 mS/cm.

In Tabel 8.1 is het resultaat van de kruisvalidatie gegeven als de MAE voor interpolatie iteraties 1 t/m 5, uitgesplitst naar de verschillende EC_w klassen. Interpolatie met anisotropie (na iteratie 1) levert een lagere MAE op voor met name EC_w waarden tot 10 mS/cm dan isotrope interpolatie (iteratie 1). De hogere EC_w waarden bevinden zich over het algemeen te ver van de smalle zoetwater voorkomens om voordeel te hebben van interpolatie met anisotropie. Voor de lagere EC_w klassen is sprake van een afname van de MAE van iteratie 1 tot en met iteratie 3. Daarna levert het gebruik van meer iteraties geen significante verlaging meer op van de MAE. Voor de nauwkeurigheid van de interpolatiemethode betekent dit dat de schatting van EC_w een optimum bereikt bij de derde iteratie. De uiteindelijke interpolatie is dan ook met dit aantal iteraties is uitgevoerd.

Tabel 8.1 MAE van kruisvalidatie resultaat uitgesplitst naar EC_w klassen, zoals behaald na een aantal iteraties.

EC _w [mS/cm]	iteratie				
	1	2	3	4	5
0-2	0.24	0.20	0.20	0.19	0.19
2-5	0.45	0.38	0.36	0.37	0.37
5-10	0.47	0.46	0.44	0.45	0.44
10-25	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
>25	0.35	0.33	0.33	0.33	0.33

9 Toetsing aan veldgegevens

9.1 Introductie

De resultaten zijn gevalideerd met behulp van verschillende typen beschikbare grondmetingen, om inzicht te krijgen in hoe goed de AEM resultaten de 'werkelijkheid' (want ook grondmetingen gaan gepaard met onzekerheid) representeren. De validatie vindt plaats op het 3D AEM resultaat. Voor grondwateranalyses wordt een directe geklassificeerde vergelijking gemaakt tussen een meetwaarde en het AEM resultaat op dezelfde x,y,z locatie. Voor de verschillende grondmetingen wordt een vergelijking gemaakt tussen de ligging van de overgangszone tussen zoet en zout grondwater. De beschikbare Vertical Electrical Soundings zijn niet gebruikt voor directe validatie, met name omdat deze reeds ten grondslag liggen aan de Verziltingskaart, waar het AEM resultaat mee wordt vergeleken (Hoofdstuk 11).

Mede op grond van de vergelijkingsresultaten is een 'conservatieve' en 'optimistische' schatting onderscheiden van de hoeveelheid zoet grondwater op basis van het AEM resultaat. Deze twee varianten worden apart vergeleken met de beschikbare grondwater analyses.

9.2 Methode

9.2.1 Analyses grondwater

Voor 754 ondiepe grondwaterfilters zijn gemiddelde waarden van saliniteit (uitgedrukt in mg/l chloride en omgerekend naar EC25) beschikbaar in de gerealiseerde grondmetingen database. Voor diepere afzettingen (ouder dan Quartair) zijn daarnaast nog 291 metingen van de VMM beschikbaar (Tabel 4.2). Deze metingen liggen niet allemaal binnen de grenzen van het 3D resultaat. In totaal zijn daarom uiteindelijk 852 metingen beschikbaar voor de vergelijking. Het overgrote deel van deze metingen is van recente datum, ze liggen over het algemeen goed ruimtelijk verspreid over het studiegebied (Figuur 4.1). Een deel van deze metingen (de 214 metingen die dicht bij een vlieglijn liggen) is ook gebruikt voor het bijstellen van de relatie tussen bulk geleidbaarheid en saliniteit paragraaf 7.4). Om de vergelijkingsset niet te klein te maken, en omdat de bijstelling van de relatie beperkt is gebleven, is er pragmatisch voor gekozen deze metingen ook mee te nemen in deze vergelijking.

De vergelijking met grondwateranalyses vindt vervolgens plaats door de waarden op de xyz locatie van het midden van het peilfilter te vergelijken met de waarde op dezelfde xyz locatie in het 3D resultaat. Hierbij worden beide waarden eerst geklassificeerd. Hierbij zijn verschillende klasseringen toegepast. De gedetailleerde klassering volgt de binnen de interpolatie toegepaste indicator-waarden en is de meeste gedetailleerde indeling die na de 3D interpolatie mogelijk is. Voor openbare uitlevering van de data wordt slechts een indeling gemaakt in zoet – brak - zout. De indeling in 5 klassen is een klassering die hier het midden tussen houdt (Tabel 9.1).

Tabel 9.1 Klasseringen saliniteit (EC25, mS/cm) in validatie

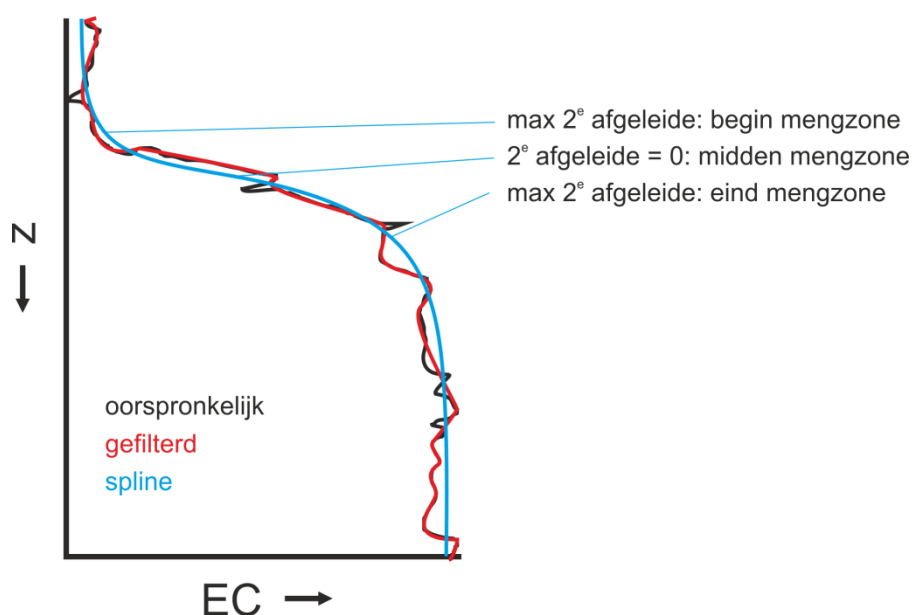
Klassering 13 klassen	Klassering 5 klassen	Klassering zoet – brak - zout
0.0 - 1.0	0.0 - 2.0	zoet: 0.0 - 2.0
1.0 - 2.0	2.0 - 5.0	brak: 2.0 - 25.0
2.0 - 2.5	5.0 - 10.0	zout: > 25.0 mS/cm
2.5 - 3.0	10.0 - 25.0	
3.0 - 3.5	> 25.0 mS/cm	
3.5 - 4.0		
4.0 - 5.0		
5.0 - 6.0		
6.0 - 7.0		
7.0 - 10.0		
10.0 - 15.0		
15.0 - 25.0		
> 25.0 mS/cm		

9.2.2 Geofysische grondmetingen

Voor de geofysische grondmetingen is een één-op-één vergelijking niet mogelijk, omdat deze metingen bulk geleidbaarheid of bulk resistiviteit rapporteren. In het 3D resultaat is daarentegen sprake van grondwater geleidbaarheid. Met deze metingen vergelijken we daarom alleen het patroon van de overgang tussen zoet en zout: de diepteligging van de (bovenkant en midden van de), overgangszone tussen zoet en zout. De boven- en onderkant van de overgangszone tussen zoet en zout zijn niet gelijk aan het bekende verziltingsvlak van De Breuck et al. (1974; 1989).

Met een automatische procedure, gebaseerd op Siemon et al. (2018), wordt het grensvlak bepaald. Deze procedure kent de volgende stappen:

1. Filtering van de data met behulp van een moving-average filter. Kleine variaties die niets te maken hebben met de ligging van het grensvlak, maar wel de volgende interpolatiestap bemoeilijken, worden op deze wijze uit de data gehaald.
2. Fit van een 'cubic spline' door de data. Met behulp van splines ("strooklatten") kunnen op relatief eenvoudige wijze krommen beschreven en bewerkt worden.
3. Bepalen van afgeleiden van de cubic spline, en daarmee de ligging van het midden van het grensvlak (tweede afgeleide = 0). De maximale tweede afgeleiden worden gebruikt om de boven- en onderkant van de overgangszone te bepalen.



Figuur 9.1 Schematisch voorbeeld procedure bepalen grensvlak zoet – zout.

Deze methode is niet altijd succesvol in het vinden van het juiste grensvlak, door de volgende oorzaken:

- te grote invloed van lithologische variaties in het EC-profiel (met name grondmetingen)
- meetprofiel gaat niet diep genoeg om hele overgang te bevatten
- profiel geen klassieke overgang van zoet naar zout

Door hun grote hoeveelheid is niet eenvoudig te controleren of alle gefitte profielen logische uitkomsten geven. De resultaten moeten dan ook vooral op basis van gemiddelde afwijkingen worden geïnterpreteerd. De volgende grondmetingen zijn beschikbaar (Tabel 9.2):

Tabel 9.2 Beschikbare grondmetingen voor validatie.

Meting	Aantal opgenomen in database
Boorgatmeting resistiviteit	375
Elektromagnetische boorgatsonde	15
SlimFlex	8
Vertical Electrical Sounding	1187

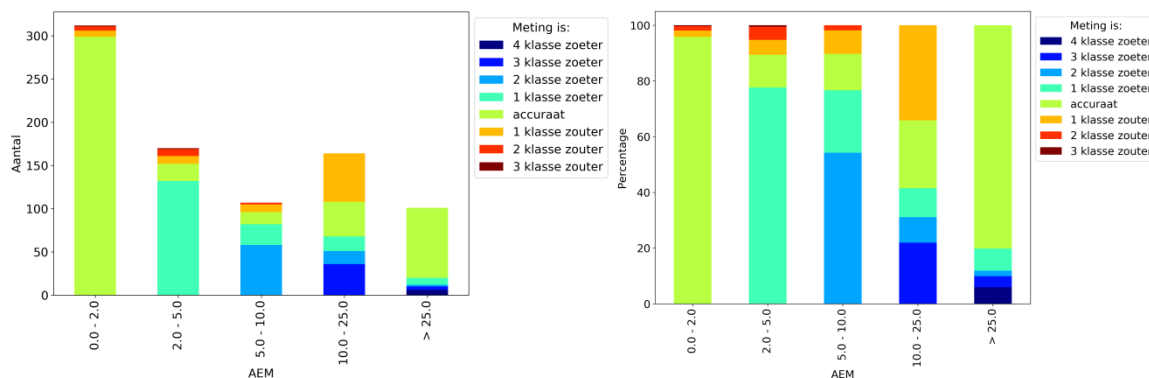
De vele beschikbare VESSen zijn wegens een aantal redenen niet gebruikt voor validatie van het AEM resultaat. Ten eerste wordt het AEM resultaat al vergeleken met de verziltingskaart van De Breuck et al. (1974; 1989) waar deze VESSen aan ten grondslag lagen (Hoofdstuk 11). Ten tweede werkt de fitprocedure minder goed bij het beperkte aantal lagen van de VESSen. Ten derde is het grensvlak uit de VESSen niet eenvoudig te interpreteren (Vandenbohede et al., 2015) en vergelijking met een door het AEM resultaat gefitte cubic spline daarmee niet eenduidig.

9.3 Resultaten vergelijking

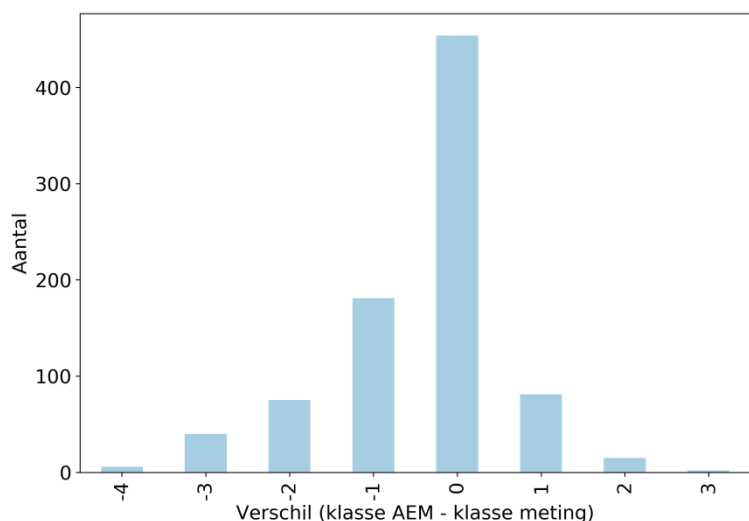
9.3.1 Analyses grondwater

Figuur 9.2 geeft een vergelijking tussen de (geclassificeerde) vanuit de AEM survey bepaalde EC waarden van het grondwater en de in het grondwater gemeten EC waarden. Figuur 9.2 toont de vergelijking voor de vijf klassen (Tabel 9.1). Het beeld is voor de andere twee

indelingen gelijk. Voor zowel de zoetste (0 – 2 mS/cm) als de zoutste klasse (> 25 mS/cm) is de overeenkomst erg goed te noemen. Voor de zoetste klasse komt meer dan 95% overeen, voor de zoutste klasse is dit ongeveer 80%. Voor de tussenliggende klassen is de overeenkomst beduidend lager. Dit is naar verwachting, omdat met name in deze klassen de invloed van de lithologie het belangrijkste is, en onderscheid moet worden gemaakt tussen brak grondwater in zandige afzettingen en zoet grondwater in kleiige afzettingen.



Figuur 9.2 Vergelijking tussen EC klasse AEM en EC klasse in grondwateranalyses, in absolute aantallen (links) en relatief (rechts), voor de 5 klassen 0 – 2, 2 – 5, 5 – 10, 10 – 25, > 25 mS/cm.



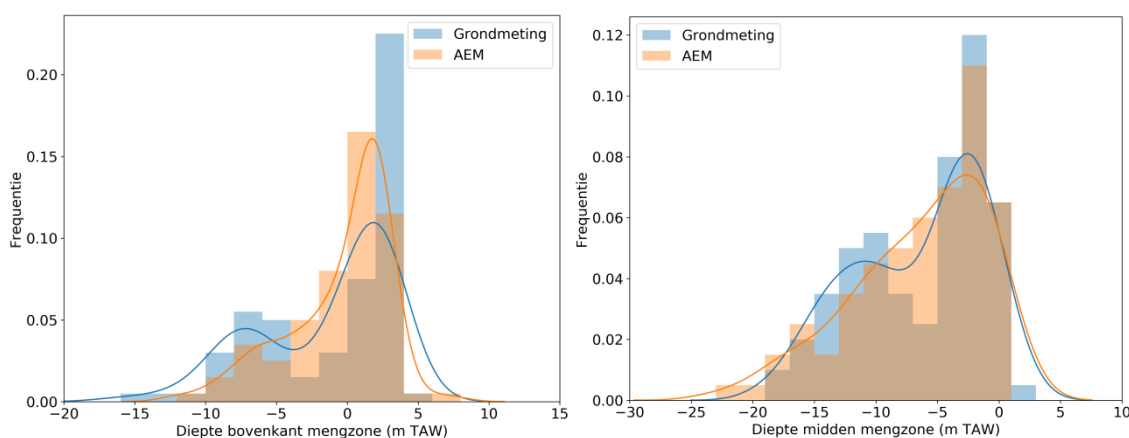
Figuur 9.3 Histogram van de verschillen in EC klasse tussen de AEM survey en de meting. Een negatieve waarde betekent dat de meting een x aantal klassen zoeter is dan de waarde volgens de AEM survey, een positieve waarde juist zouter.

Uitgezet in een histogram over alle metingen (Figuur 9.3) is een duidelijk scheve verdeling naar links zichtbaar. De AEM resultaten geven ten opzichte van de metingen daarmee een relatief zouter beeld. Gegeven de goede resultaten in de uiterste klassen, zit deze verschuiving met name in de tussenliggende klassen. Dit is ook op te maken uit Figuur 9.2, waar de metingen voor de licht brakke AEM klasse 2 – 5 mS/cm bijvoorbeeld voor 75% zoet zijn (minder dan 2 mS/cm). Dit kan komen doordat de AEM een gemiddelde waarde geeft van een groter volume, dat gemiddeld wat brakker kan uitkomen dan de puntmetingen, of dat de bulk geleidbaarheid meer wordt beïnvloed door de oppervlaktegeleidbaarheid van de kleifracatie dan waarmee in de omrekening rekening wordt gehouden.

9.3.2 Geofysische grondmetingen (uitgezonderd VES)

Van de 398 beschikbare grondmetingen vallen er 270 binnen het gevlogen gebied. Van deze 270 metingen kon voor 240 metingen een bovenkant van de zoet-zout overgangszone worden bepaald, en voor 95 een midden van de overgangszone. Dit laatste aantal komt lager uit doordat de meting voor een goede fit tot enige diepte in het zoute grondwater moet zijn uitgevoerd.

Figuur 9.4 geeft de verdeling van de bepaalde bovenkant en van het midden van de overgangszone tussen zoet en zout grondwater, voor zowel het 3D AEM resultaat als de grondmetingen. Het betreft hier dus geen vergelijking van het bekende verziltingsvlak tussen de grondmetingen en het AEM resultaat (De Breuck et al., 1974; 1989). De verdelingen laten ruwweg dezelfde vorm zien. De verdeling van de grondmetingen vertoont wel meer twee duidelijke pieken, waar de verdeling van het AEM resultaat geleidelijker verloopt.



Figuur 9.4 Verdeling van de bepaalde bovenkant (links) en het midden (rechts) van de zoet-zout overgangszone. Oranje is het AEM resultaat, blauw de grondmetingen. De lijnen geven het Kernel density estimate (KDE) van de verdelingen weer, een statistische techniek die toelaat om een vloeiende curve doorheen een bepaalde dataset te tekenen.

In Tabel 9.3 worden de karakteristieken van de afwijkingen tussen de ligging van de overgangszone in het AEM resultaat en de grondmetingen gegeven. Gemiddeld ligt de bovenkant van de overgangszone 0.8 m ondieper in het AEM resultaat dan in de grondmetingen, het midden van de overgangszone verschilt gemiddeld niet tussen het AEM resultaat en de grondmetingen. De gemiddelde absolute afwijking bedraagt 1.8 m voor de bovenkant van de overgangszone en 2.5 m voor het midden van de overgangszone. De Root Mean Squared Error (RMSE) waarden zijn voor zowel de bovenkant als het midden van de overgangszone nog ongeveer een meter groter, wat duidt op de aanwezigheid van flinke uitschieters in de afwijkingen. Een klein aantal grotere afwijkingen is te verwachten bij een dergelijke automatische procedure, aangezien deze bij een klein deel van de gefitte profielen niet op een correcte fit uit zal komen.

Tabel 9.3 Karakteristieken afwijkingen diepteligging (in m) zoet-zout overgangszone AEM resultaat en grondmetingen.

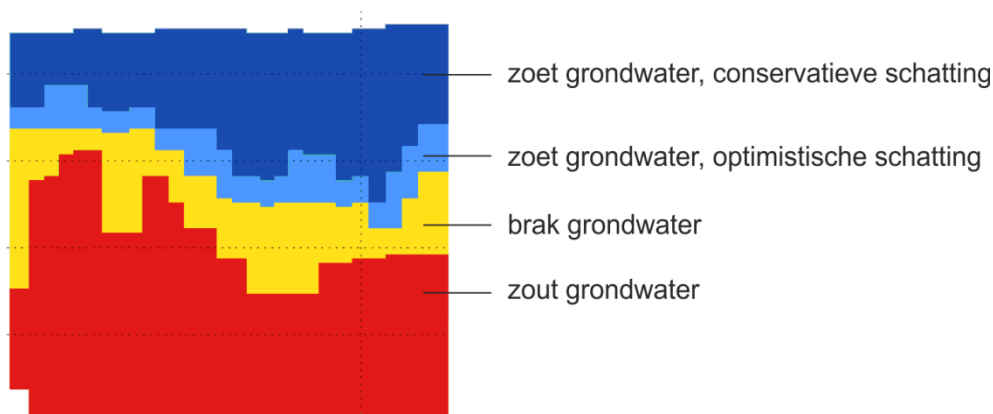
	Bovenkant overgangszone	Midden overgangszone
Gemiddelde afwijking (m)	0.81	0.04
Root Mean Squared Error (m)	2.85	3.63
Mean Absolute Error (m)	1.76	2.52
Aantal metingen (-)	246	96

9.4 Omgaan met onzekerheden: een conservatieve en optimistische schatting van de hoeveelheid zoet grondwater

Uit de resultaten van de validatie blijkt dat het AEM resultaat voor zoet en zout grondwater goed overeenkomt met de beschikbare grondwateranalyses, maar dat voor het brakke bereik in het AEM resultaat veelal geldt dat de metingen zoeter zijn. Tegelijkertijd is in de hele gevolgde procedure, in de airborne metingen, de inversie, de verticale resolutie, de stap naar grondwatergeleidbaarheid, en de 3D interpolatie sprake van onzekerheden. De geconstateerde afwijkingen in het brakke bereik zijn goed verklaarbaar gegeven deze onzekerheden.

Uit de vergelijking met de grondwateranalyses blijkt dat de klasse 2 – 5 mS/cm in het AEM resultaat in 75% van de gevallen eigenlijk zoet (0 – 2 mS/cm) grondwater bevat. Bij zoutere klassen in het AEM resultaat neemt dit percentage zoet grondwater duidelijk af. Om meer recht te doen aan zowel de onzekerheden in de gevolgde procedure, als de – afgaande op de grondwateranalyses – te brakke waarden in het AEM resultaat, is daarom besloten om resultaten van de grondwater EC25 weer te geven in alleen de klassen zoet (0 – 2 mS/cm), brak (2 – 25 mS/cm) en zout (> 25 mS/cm). Daarnaast worden twee inschattingen weergegeven van de zoetwatervoorraad. Allereerst een *conservatieve schatting*, waarbij deze indeling volledig wordt gevolgd voor het AEM resultaat. Daarnaast een *optimistische schatting*, waarbij we ervan uitgaan dat AEM waarden tot 5 mS/cm een grote kans hebben om in werkelijkheid zoet grondwater bevatten. Deze waarden worden dan ingedeeld in de zoet grondwater categorie. De brak – zout grens ligt voor zowel de conservatieve als de optimistische schatting op 25 mS/cm.

Het resultaat (Figuur 9.5) geeft zo een conservatieve inschatting van het aanwezige zoete grondwater, waar de kans erg groot is dat er ook daadwerkelijk zoet grondwater wordt gevonden, en daarnaast een optimistische schatting, waar de kans nog steeds aanzienlijk is dat er daadwerkelijk zoet grondwater wordt gevonden.



Figuur 9.5 Voorbeeld conservatieve en optimistische schatting zoet grondwater

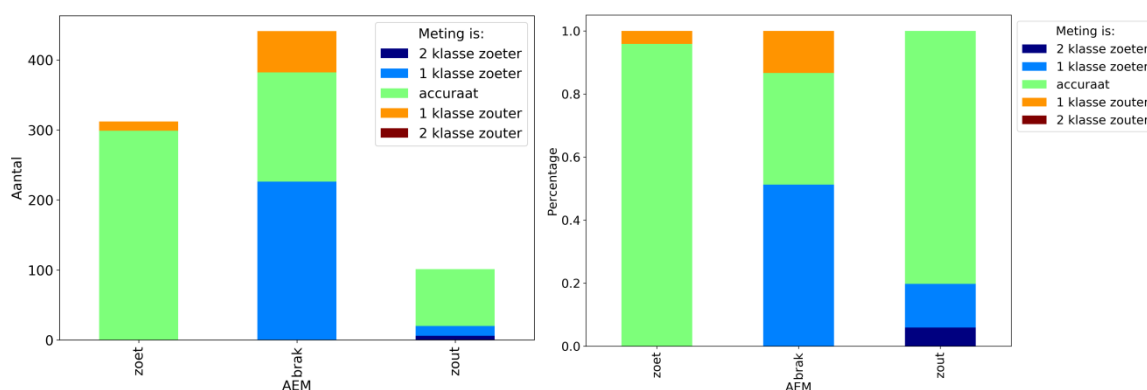
9.5 Validatie conservatieve en optimistische schatting zoetwatervoorraad

In de validatie van de conservatieve en optimistische schatting worden het AEM resultaat en de grondwateranalyses geclassificeerd in de drie klassen zoet, brak en zout. Voor de grondwateranalyses en de conservatieve schatting ligt de grens tussen zoet en brak op 2 mS/cm, voor de optimistische schatting is deze grens 5 mS/cm (Tabel 9.4).

Tabel 9.4 Klassenindeling zoet – brak – zout voor validatie conservatieve en optimistische schatting

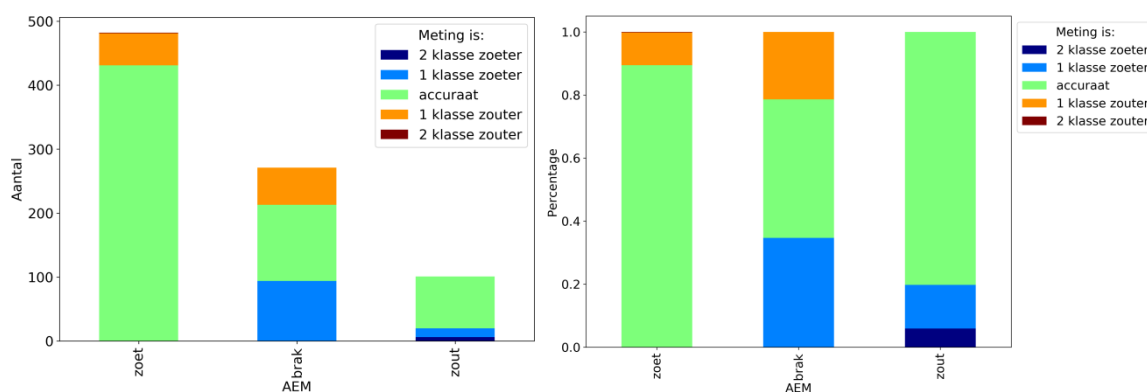
	Grondwater analyses	AEM resultaat - conservatief	AEM resultaat - optimistisch
Zoet	0 – 2 mS/cm	0 – 2 mS/cm	0 – 5 mS/cm
Brak	2 – 25 mS/cm	2 – 25 mS/cm	5 – 25 mS/cm
Zout	> 25 mS/cm	> 25 mS/cm	> 25 mS/cm

Figuur 9.6 geeft de resultaten voor de conservatieve schatting. Dit geeft een gelijk beeld als de eerdere vergelijking in vijf klassen. Zoet en zout laten een goede overeenkomst zien (respectievelijk meer dan 95% en 80% overeenkomst), in de brakke klasse komen meer afwijkingen voor. De gemiddelde afwijking is 0.21 klasse (AEM resultaat zouter dan meting), gemiddelde absolute afwijking is 0.38 klasse (Tabel 9.5).



Figuur 9.6 Vergelijking tussen EC klasse AEM (conservatieve schatting) en EC klasse in grondwateranalyses, in absolute aantallen (links) en relatief (rechts), voor de klassen zoet, brak en zout.

Figuur 9.7 geeft de resultaten voor de optimistische schatting. Het verschil met de conservatieve schatting laat zich zien in de iets mindere overeenkomst in de zoete klasse (89% overeenkomst in plaats van 96%), terwijl de brakke klasse juist beter overeenkomt met de grondwateranalyses. De zoute klasse is uiteraard gelijk aan de conservatieve schatting. De gemiddelde afwijking voor de optimistische schatting is 0.01 klasse (AEM resultaat gemiddeld gelijk aan meting), de gemiddelde absolute afwijking is 0.27 klasse (Tabel 9.5). Deze verbetering ten opzichte van de conservatieve schatting komt vooral doordat de brakke klasse beduidend minder afwijkt van de grondwateranalyses.



Figuur 9.7 Vergelijking tussen EC klasse AEM (optimistische schatting) en EC klasse in grondwateranalyses, in absolute aantallen (links) en relatief (rechts), voor de klassen zoet, brak en zout.

Tabel 9.5 Karakteristieken afwijkingen conservatieve en optimistische schatting.

	Conservatieve schatting	Optimistische schatting
Overeenkomst 'zoet'	96%	89%
Overeenkomst 'brak'	35%	44%
Overeenkomst 'zout'	80%	80%
Gemiddelde afwijking (m)	0.21	0.01
Mean Absolute Error (m)	0.38	0.27

Samenvattend geeft de conservatieve schatting een betere overeenkomst met de grondwateranalyses voor de zoete klasse. De zekerheid dat, wanneer het AEM resultaat zoet aangeeft, het grondwater ook daadwerkelijk zoet is, is hier erg groot. Voor de optimistische schatting is de overeenkomst iets minder, hoewel nog steeds (zeer) goed te noemen (89%). Over de vier klassen heen geeft de optimistische schatting betere resultaten dan de conservatieve schatting, de gemiddelde afwijking in het AEM resultaat is nagenoeg nul, en ook de absolute afwijking is beduidend kleiner.

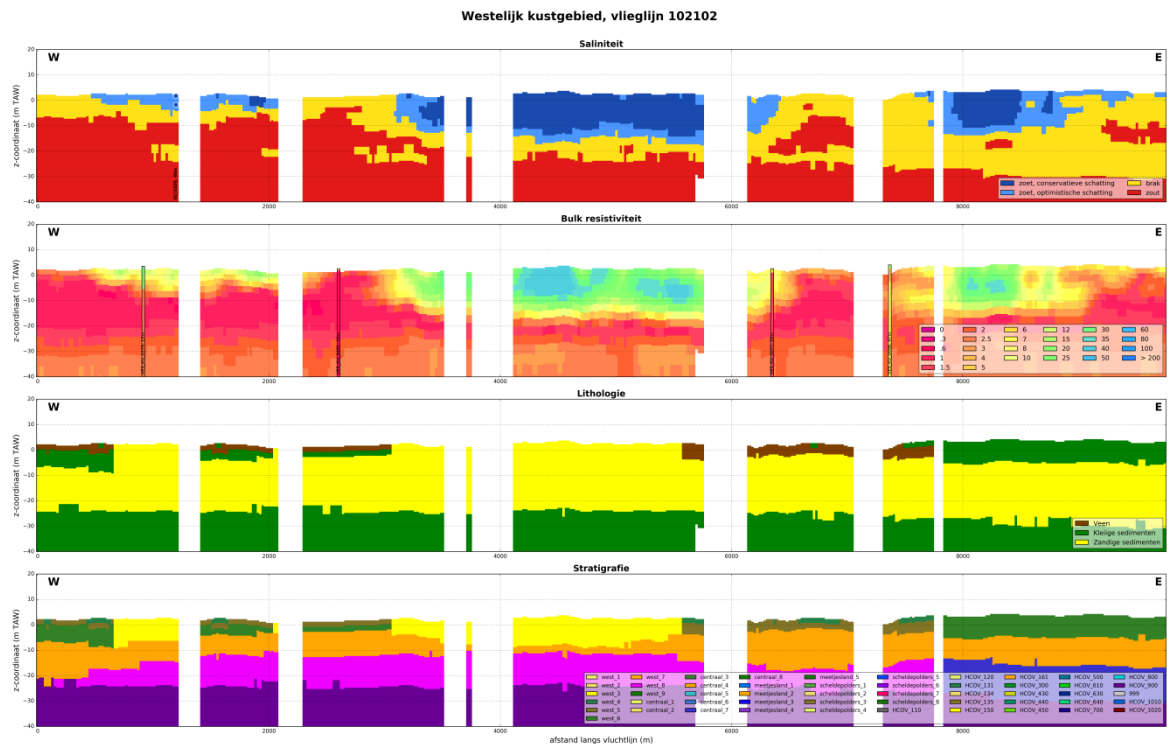
10 Resultaten

10.1 Introductie

De uitgevoerde AEM survey en de daaropvolgende uitwerking van de metingen heeft geleid tot een 3D voxelmodel van grondwatersaliniteit voor nagenoeg de gehele kustregio van Vlaanderen. De resultaten zijn op verschillende manieren beschikbaar, deze worden in dit hoofdstuk toegelicht. Het op AEM gebaseerde zoet-brak grensvlak wordt in Hoofdstuk 11 uitgebreid vergeleken met de bekende verziltingskaart van Vlaanderen (De Breuck, 1974, 1989). Hoofdstuk 12 bevat een discussie van de resultaten.

10.2 Verticale profielen op de vlieglijnen

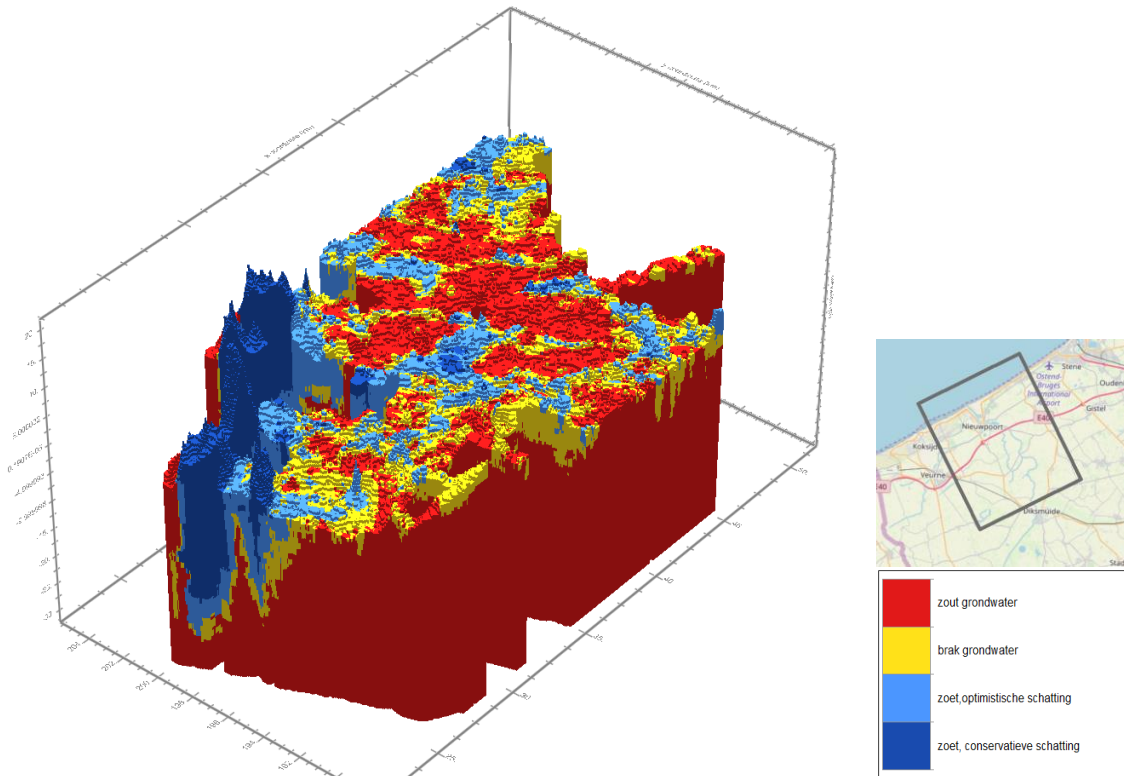
Voor alle vlieglijnen zijn verticale profielen langs de vlieglijn beschikbaar die de saliniteit van het grondwater weergeven. In deze figuren is voor de interpretatie de saliniteit weergegeven samen met de bulk resistiviteit, de lithologie, en de stratigrafie volgens het lithologisch model uit Hoofdstuk 3, aangevuld met de HCOV laagindeling (Meyus et al., 2000). In de figuren zijn regelmatig onderbrekingen zichtbaar, op deze locaties kon de AEM survey geen betrouwbare meting verrichten. In het 3D resultaat kent het merendeel van deze locaties door interpolatie wel gegevens. De horizontale resolutie van deze figuren is de meetresolutie van de AEM survey, met ongeveer een meting per 10 à 15 m. De verticale resolutie is de laagindeling van de inversie (Tabel 6.2). Figuur 10.1 geeft een voorbeeld van de beschikbare resultaten per vlieglijn.



Figuur 10.1 Voorbeeld resultaat per vlieglijn (vlieglijn 102102, Westelijk Kustgebied)

10.3 3D beeld saliniteit grondwater

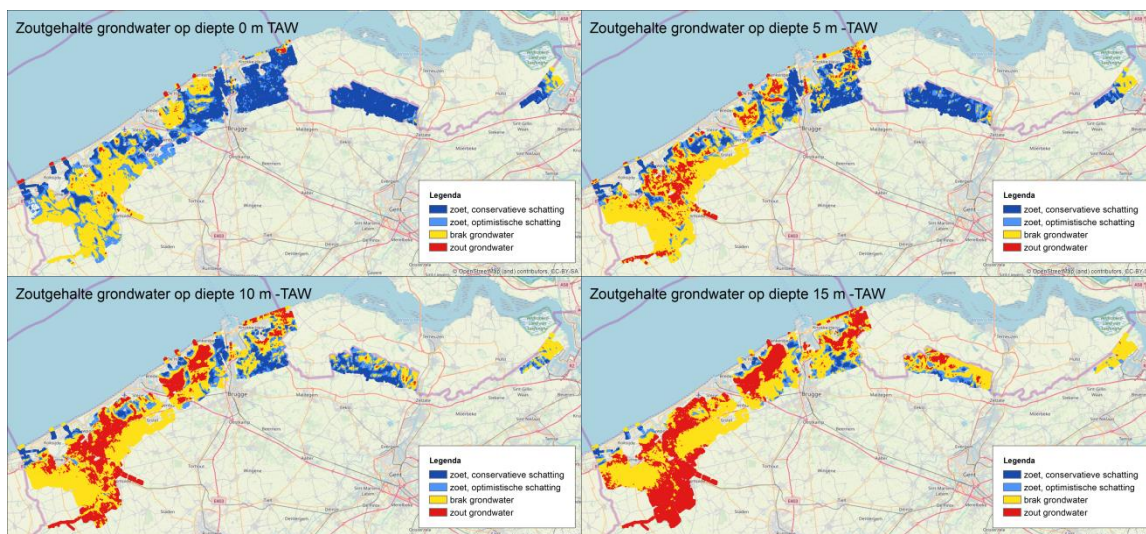
Resultaat van de 3D interpolatie is een driedimensionaal voxelmodel van de ingeschatte grondwatersaliniteit, met voxels van 50 x 50 m horizontaal en 0.5 m verticaal. Figuur 10.2 geeft een beeld van het 3D resultaat voor een gebied rond Nieuwpoort.



Figuur 10.2 Driedimensionaal beeld van saliniteit grondwater in deelgebied Westelijke kuststreek.

10.4 Ruimtelijk beeld saliniteit op diepte intervallen

Op basis van het 3D resultaat zijn doorsneden gemaakt op verschillende diepten ten opzichte van TAW en ten opzichte van het lokale maaiveld. Figuur 10.3 is hier een voorbeeld van, en toont de saliniteit van het grondwater op diepten 0, -5, -10 en -15 m TAW.



Figuur 10.3 Zoutgehalte grondwater op verschillende diepten ten opzichte van TAW.

10.5 Diepteligging zoet – brak grensvlak

De diepteligging van het grensvlak tussen zoet grondwater en brak grondwater is voor zowel de conservatieve (Figuur 10.4), als voor de optimistische schatting (Figuur 10.5) beschikbaar.



Figuur 10.4 Diepteligging (m –mv) zoet-brak grensvlak – conservatieve schatting.

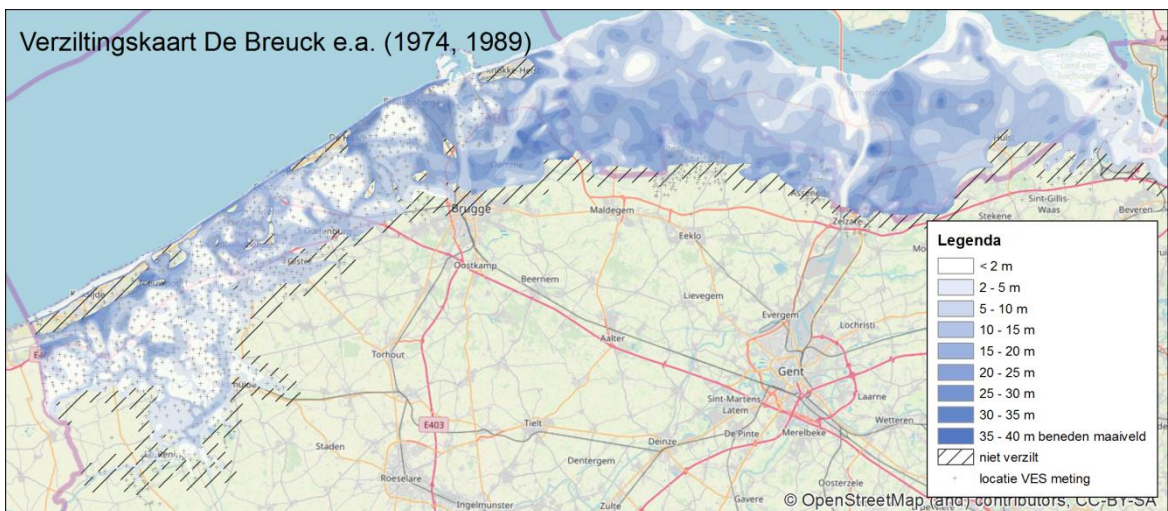


Figuur 10.5 Diepteligging (m –mv) zoet-brak grensvlak – optimistische schatting.

11 Vergelijking met verziltingskaart en op vier referentieprofielen

11.1 Introductie

In 1974 en 1989 publiceerden De Breuck et al. de eerste verziltingskaart van Vlaanderen, gesteund op een zeer groot aantal (VES-) metingen en kennis van de ondergrond en ontstaansgeschiedenis van Vlaanderen (Figuur 11.1). Vandenbohede et al. (2010) concludeerden recent nog dat nieuw verzamelde gegevens (waterkwaliteitsanalyses en boorgatmetingen) goed met deze verziltingskaart overeen kwamen.



Figuur 11.1 Verziltingskaart De Breuck et al. (1974, 1989), versie 2011.

In dit project is op basis van een uitgebreide AEM survey een nieuwe verziltingskaart afgeleid voor de Vlaamse kustregio (Figuur 10.4). In dit hoofdstuk worden de oude en nieuwe kaart uitgebreid met elkaar vergeleken.

Naast verschillen tussen de beide verziltingskaarten is ook gekeken naar de resultaten voor vier 'referentieprofielen', veelal kustdwarse profielen waar in het verleden veel verziltingsonderzoek is gedaan.

11.2 Verschillen tussen beide verziltingskaarten

Bij het vergelijken van de verziltingskaarten moet rekening gehouden worden met het feit dat beide kaarten met een verschillende methodologie zijn opgesteld, en dat dit verregaande gevolgen kan hebben voor de betekenis van de bekomen resultaten en de verschillen in diepten van het grensvlak dat op de kaarten is aangeduid.

De oude verziltingskaart is gesteund op puntwaarnemingen (locatie VES metingen) waarvoor per punt een verticale verdeling van de formatieresistiviteiten is bekomen in een beperkt aantal uniforme lagen (gewoonlijk tussen 2 en 5). De aldus bekomen formatieresistiviteiten hebben een éénduidige relatie met de grondwatersaliniteit. Het grensvlak werd gelegd waar een duidelijk contrast in hogere en lagere resistiviteiten optrad. Het grensvlak komt dus niet overeen met één specifieke resistiviteitswaarde (zie ook Vandenbohede et al., 2015). Daarbij werd wel vastgesteld dat het grensvlak inderdaad meestal overeenkomt met een TDS van

ongeveer 1.5 mg/L, hoewel de resistiviteit van de modellagen boven en onder het grensvlak een brede range kan aannemen. Op de plaatsen van de VES metingen is de resistiviteitsopbouw betrouwbaar, maar om een spatiaal gebiedsdekkende kaart te bekomen, moest er tussen de punten geïnterpoleerd worden. Deze interpolatie is manueel uitgevoerd (in de jaren 1970 waren nog geen digitale hulpmiddelen beschikbaar) waarbij secundaire informatie gebruikt is uit de bodemkaart (ligging poelgronden en kreekruigen) en terreinkennis. De dieptelijnen van het grensvlak zijn ook manueel getraceerd waarbij een beperkt aantal intervallen gebruikt is (minder dan 2 m diep, van 2 tot 5 m, van 5 tot 10 m, etc.). De onzekerheid op de positie van het grensvlak zit hier vooral tussen de puntmetingen in en dan vooral op locaties waar er scherpe overgangen (zoals randen van een zoetwaterlens) zijn.

De conservatieve schatting van zoet grondwater op basis van de AEM survey kent een grotere ruimtelijke resolutie. Er zijn echter zones, vaak langwerpige van vorm, die ofwel vanwege vliegbeperkingen niet in het opgemeten gebied waren opgenomen, ofwel vanwege storingselementen niet tot bruikbare resultaten hebben geleid. Daardoor vertoont de nieuwe kaart een aantal blanco, niet gekarteerde zones waarvoor uiteraard geen vergelijking kan gemaakt worden. Verder heeft de toenemende urbanisatie, industrialisatie en toeristische ontwikkeling sinds de metingen voor de eerdere verziltingskaart (hoofdzakelijk uitgevoerd in de jaren '60 van de vorige eeuw) er voor gezorgd dat sommige locaties die in de jaren zestig nog agrarisch waren, nu door aanwezige infrastructuur voor verstoringen van de AEM metingen zorgen waardoor er geen betrouwbare resultaten konden bekomen worden.

Door onzekerheden in alle stappen van de gevolgde procedure is de conservatieve schatting omgeven met een niet gekwantificeerde onzekerheid. Deze onzekerheid wordt uitgebreid besproken in hoofdstukken 9 en met name 12.

Grensvlakken tussen zoet en zout grondwater kunnen verschuiven door veranderende grondwaterstroming, die bijvoorbeeld veroorzaakt kan zijn door:

- aanpassingen aan het waterlopen- en drainagestelsel
 - waterwinning en pompputten, veranderingen van pompgebieden
 - veranderingen in grondwateraanvulling, door ander landgebruik en/of bodembedekking.
- Deze invloedsfactoren werken meestal op lange tijdschalen en kennen een trage dynamiek. Verschillen die tussen de oude en nieuwe verziltingskaart worden vastgesteld, hoeven daarom niet in de eerste plaats te wijzen op een effectieve fysische verschuiving van het grensvlak maar kunnen wellicht vaak toegeschreven worden aan de implicaties van het verschil in methodologie die gebruikt is voor het opstellen van beide kaarten.

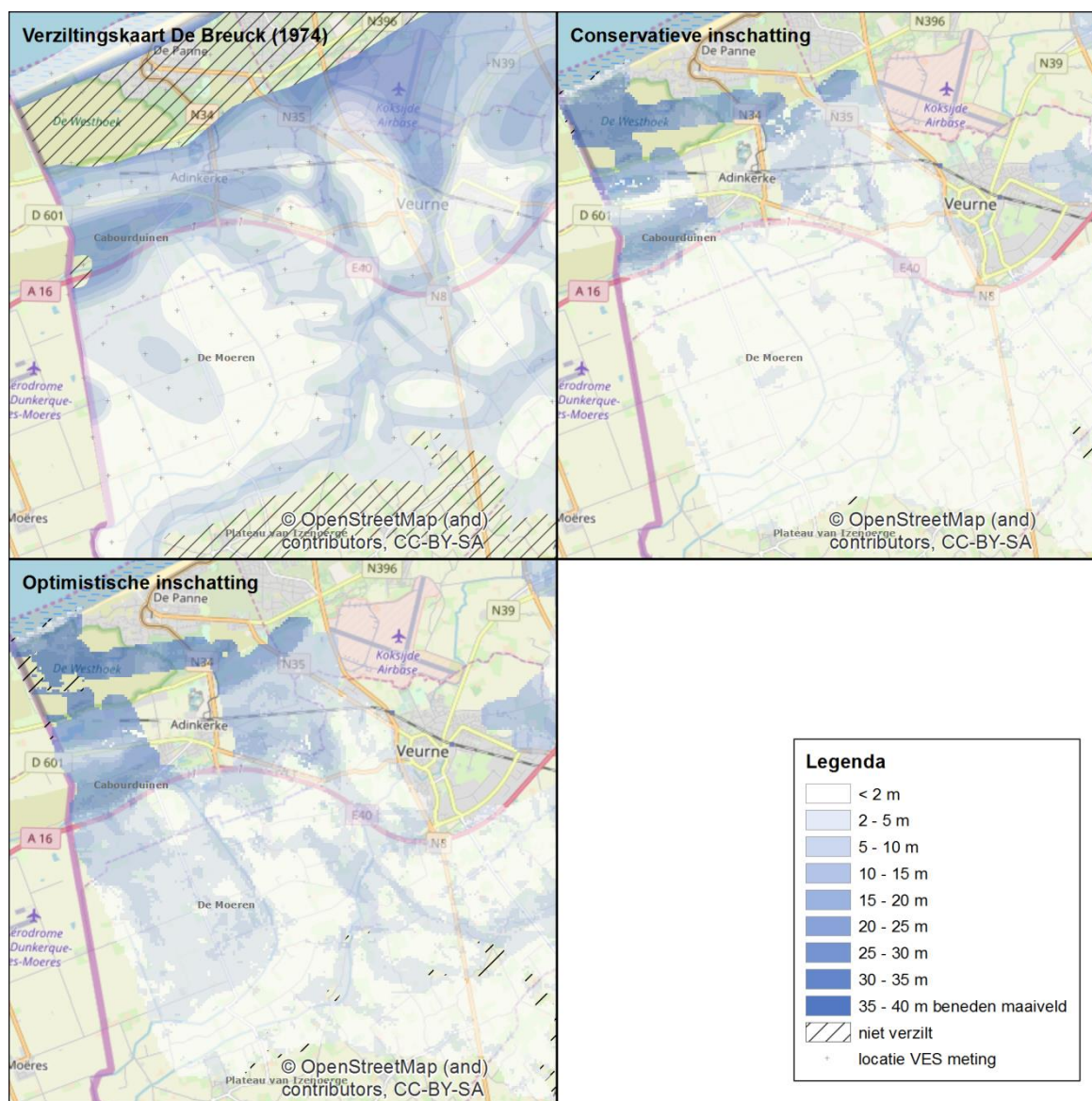
De vergelijking van de kaarten wordt besproken per deelgebied.

11.3 Deelgebied Westelijk kustgebied (ten westen van Oostende)

11.3.1 Het overdekt waddenlandschap tussen De Panne en de grens

In de 1.5 km brede strook tussen de Frans-Belgische grens in het westen en Adinkerke in het oosten, en de kustduinen in het noorden en de oude duingordel in het zuiden, komen oude wadafzettingen voor. Centraal in deze strook ligt het kanaal Nieuwpoort-Duinkerke en aan de voet van de huidige duingordel ligt een afwateringsgracht, het Langgeleed. De kaart van 1974 geeft langsheen de Vaart een ondiep grensvlak (2 tot 5 m) dat verdiept naar de naburige duinmassieven toe: onder de vaart treedt er upconing op van dieper zout water dat onderaan het reservoir zit. De AEM survey toont echter een sterke verzoeting van het noordelijk deel, tussen het Langgeleed en de Vaart. De AEM heeft geen bruikbaar resultaat opgeleverd voor de omgeving van Adinkerke ten noorden van de E40. Voor het gebied ten oosten van Adinkerke

geeft de AEM survey (conservatieve schatting) geen consistent beeld. Met de optimistische schatting wordt in dit gebied een zoetwaterlens getoond op ca 1 km ten oosten van Adinkerke centrum, ten noorden van het kanaal Duinkerke-Veurne. Hier zou zoet water tot op meer dan 15 m diepte voorkomen.



Figuur 11.2 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) rond Adinkerke.

11.3.2 Oude binnenduinen van Adinkerke (Cabourduinen)

Op de oude kaart staat het verziltingsvlak hier aangegeven op 20 tot 25 m diepte (lokaal zelfs iets dieper). De AEM survey vindt hier een diepte van 20 tot 22 m (conservatieve schatting) en ca 25 m (optimistische schatting) op het diepste punt (centraal in het duinmassief).

11.3.3 De Moeren (ten noorden van het plateau van Izenberghe)

Op de kaart van 1974 wordt het verziltingsvlak hier op een diepte van minder dan 2 m aangegeven, behalve langs de Seinenmolenvaart, waar het dieper zou zitten (5 tot 10 m). De AEM survey situeert het verziltingsvlak (conservatieve schatting) bijna steeds op minder dan 1

m diepte. In een kleine zone iets ten westen van de Seinenmolenvaart zit het lokaal wat dieper (op 4 à 5 m). De optimistische schatting toont een noordwest-zuidoost lopend patroon waarbij de verzilting ondiep (< 2 m) voorkomt in het westen en oosten van De Moeren en tussen 2 en 3 m in het centraal deel, met daartussen stroken waar het grensvlak op ca 5 m diepte zou liggen. De oriëntatie van deze stroken komt overeen met de richting van de afwateringsloten. In het noordwesten van de Moeren, tegen de Cabourduinen aan, ligt het grensvlak dieper, tot wel 10 m. Dit is wellicht veroorzaakt door een zoete instroom vanuit het oude duinmassief.

11.3.4 Tussen De Moeren en het kanaal van Lo ten zuiden van Veurne

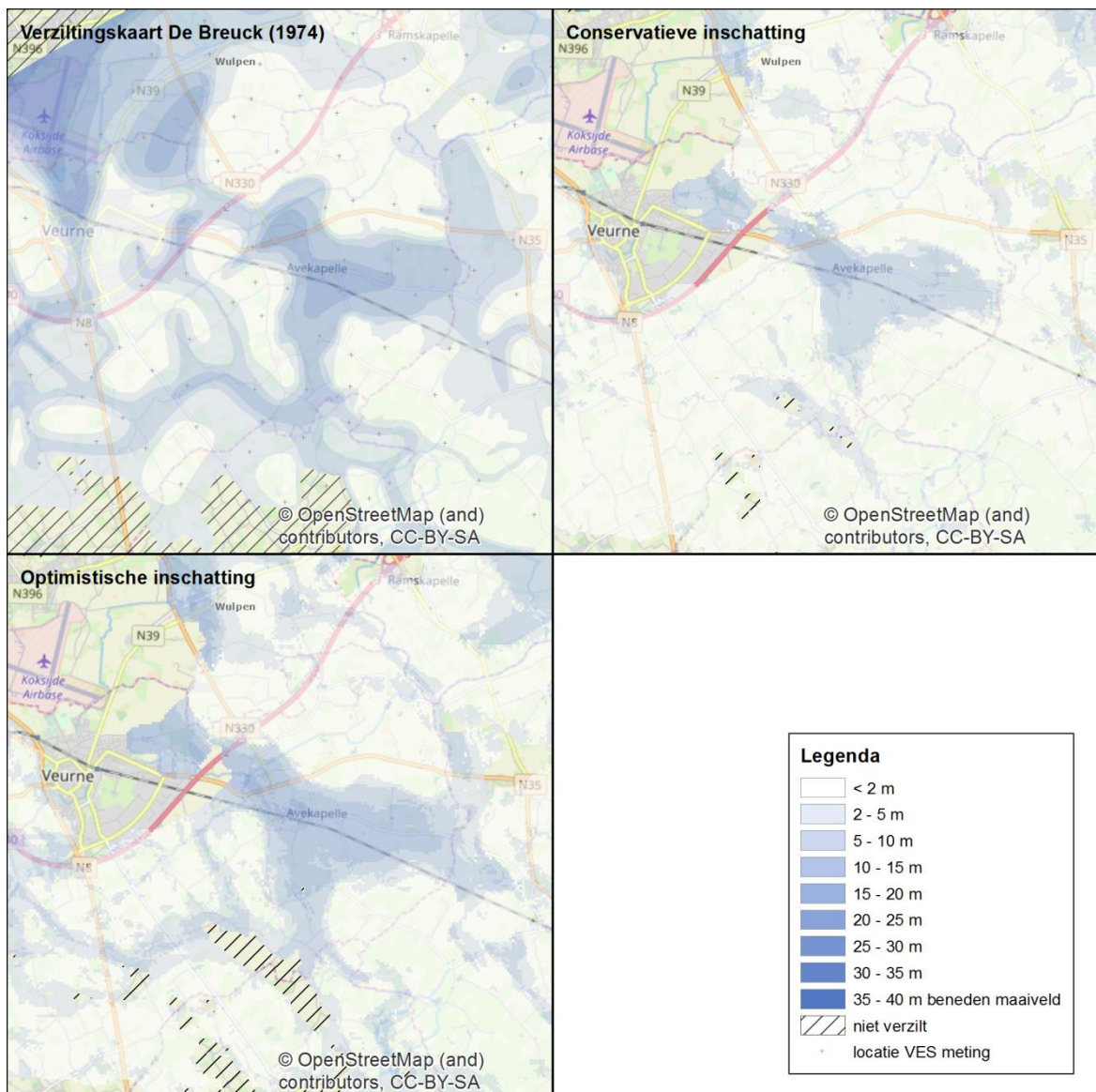
In dit gebied komt een afwisseling van kreekruigen en poelgronden voor, wat duidelijk gereflecteerd wordt in de kaart van 1974. Onder de kreekrugafzettingen werd in 1974 het verziltingsvlak meestal tussen 5 en 10 m diep getekend, in de omgeving van de E40 ten zuidwesten van Veurne zelfs tussen 10 en 15 m diep en langsheen de Klokhofstraat in Veurne zelfs tot 15 à 20 m diepte. Onder de tussenliggende poelgronden zit het zout water op minder dan 2 m diepte. Op de kaart van 2018 (conservatieve schatting) zit het verziltingsvlak onder de kreekruigen tussen 1 en 3 m diep, onder de poelgronden op minder dan een meter onder het maaiveld. De zoetwaterlens langsheen de Klokhofstraat wordt nu gesitueerd tussen 7 en 8 m diepte. De zoetwaterlens die de E40 kruist en op de kaart van 1974 ongeveer 1800 m lang getekend was, wordt in 2018 niet herkend. Wel komt er in die omgeving een smalle langgerekte zone voor met een dieper grensvlak, lokaal tot wel 5 m diep, maar deze volgt perfect de E40 autoweg en is wellicht een artefact geïntroduceerd door de snelweg zelf (constructiemateriaal). Wel zit ten noorden van Bulskamp in de kreekrug het verziltingsvlak tussen 2 en 3 m diep, met een lokale verdieping tot ca 5 m nabij de Cromfortstraat. In 1974 zit het verziltingsvlak onder de kreekruigen systematisch dieper. Voor de optimistische schatting komt het patroon op de kaart van 2018 overeen met de oude kaart en wordt gecontroleerd door de ligging van de kreekruigen. Onder de kreekruigen ligt het verziltingsvlak meestal tussen ca 5 en 7 m diepte, onder de poelgronden op minder dan 2 m. De zoetwaterlens langsheen de Klokhofstraat wordt nu iets meer naar het westen gesitueerd en zou tot maximaal 15 m diepte reiken.

11.3.5 Tussen Adinkerke en Koksijde

In het gebied dat aansluit bij de duingordel staat het grensvlak op de kaart van 1974 tamelijk diep aangegeven, zeker in de omgeving van het vliegveld van Koksijde, waar de zoetwaterwig meer dan 2 km landinwaarts doordringt. Deze zoetwaterwig is afkomstig vanuit de duingordel en is dus eigenlijk gewoon een uitloper van de zoetwaterlens van het dungebied en vormt dus geen afzonderlijke zoetwatervoorraad in de polders. Dit gebied kon vanwege de aanwezigheid van het vliegveld niet in het surveygebied opgenomen worden en met de AEM metingen geverifieerd worden.

11.3.6 Ten oosten van het kanaal van Lo: de Avekapellekreek

Hier komen volgens de kaart van 1974 twee grotere en diepere zoetwaterlenzen voor: rondom Avekapelle (de Avekapellekreek) en ten zuidwesten van Wulpen. Deze lenzen liggen slechts op 2.5 km van de kustduingordel, en bevinden zich in een situatie waar kreekrugafzettingen direct aansluiten op de duinen en geen tussenliggende poelgronden voorkomen. In beide gevallen wordt het verziltingsvlak tussen 15 en 20 m diepte getekend. Tussen beide lenzen werd een connectie getekend via een minder diepe en smalle (< 500 m brede) kreekruglens (zout water op 5 tot 10 m diepte) die ten zuidwesten van de Toekomstlaan zou lopen. Langs de oostkant heeft de Avekapellekreek nog een noord-zuid gerichte extensie, maar hier zou het verziltingsvlak op slechts 5 tot 10 m diepte zitten. Buiten deze 2 diepere lenzen wordt op de kaart van 1974 onder de kreekruigen het verziltingsvlak tussen 5 en 10 m diepte getekend. Onder de tussenliggende poelgronden zit het meestal minder dan 2 m diep.



Figuur 11.3 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) rond de Avekapellekreek.

De Avekapellekreek wordt door de recente survey goed bevestigd, maar op het diepste punt wordt het verziltingsvlak volgens de conservatieve schatting gevonden op ca 12 m diepte, maar enkel ten noordwesten van Avekapelle. Ten zuidoosten van Avekapelle is de lens een kleine 10 m, en loopt ongeveer 2.5 km door in oostelijke richting. In 1974 werd de Avekapellelens in noordelijke richting tot ca 500 m ten noorden van de N35 doorgetrokken in noordoostelijke richting. Volgens de nieuwe survey loopt de lens echter niet verder naar het noordoosten, maar naar het noordwesten door, ten westen van de rotonde met de N330. Hier zou nog 12 m zoet water zitten. Nieuw is ook dat de Avekapellelens zich nog verder naar het noordwesten uitstrekt, tot voorbij de A18. In 1974 werd een zeer kleine lens getekend tussen de Brugse Steenweg en de Proostdijkestraat. Vreemd genoeg komt hier nu ondiep zout water voor. Maar ten noorden van de Proostdijkestraat komt tot aan de Wulpendamstraat, over een breedte van ca 1 km, zoet water voor tot op een diepte van ca 10 m. Lokaal zelfs tot 12 m. In deze zone komen kreekrugafzettingen voor, die naar het noorden toe, ter hoogte van de Wulpendamstraat, abrupt begrensd worden door poelgronden. Een dergelijke

zoetwatorvoorraad staat op de kaart van 1974 niet aangegeven. Mogelijk sluit deze lens aan op de zoetwaterlens van Wulpen, maar dat kan niet geverifieerd worden omdat dit gebied in 2017 niet gekarteerd werd.

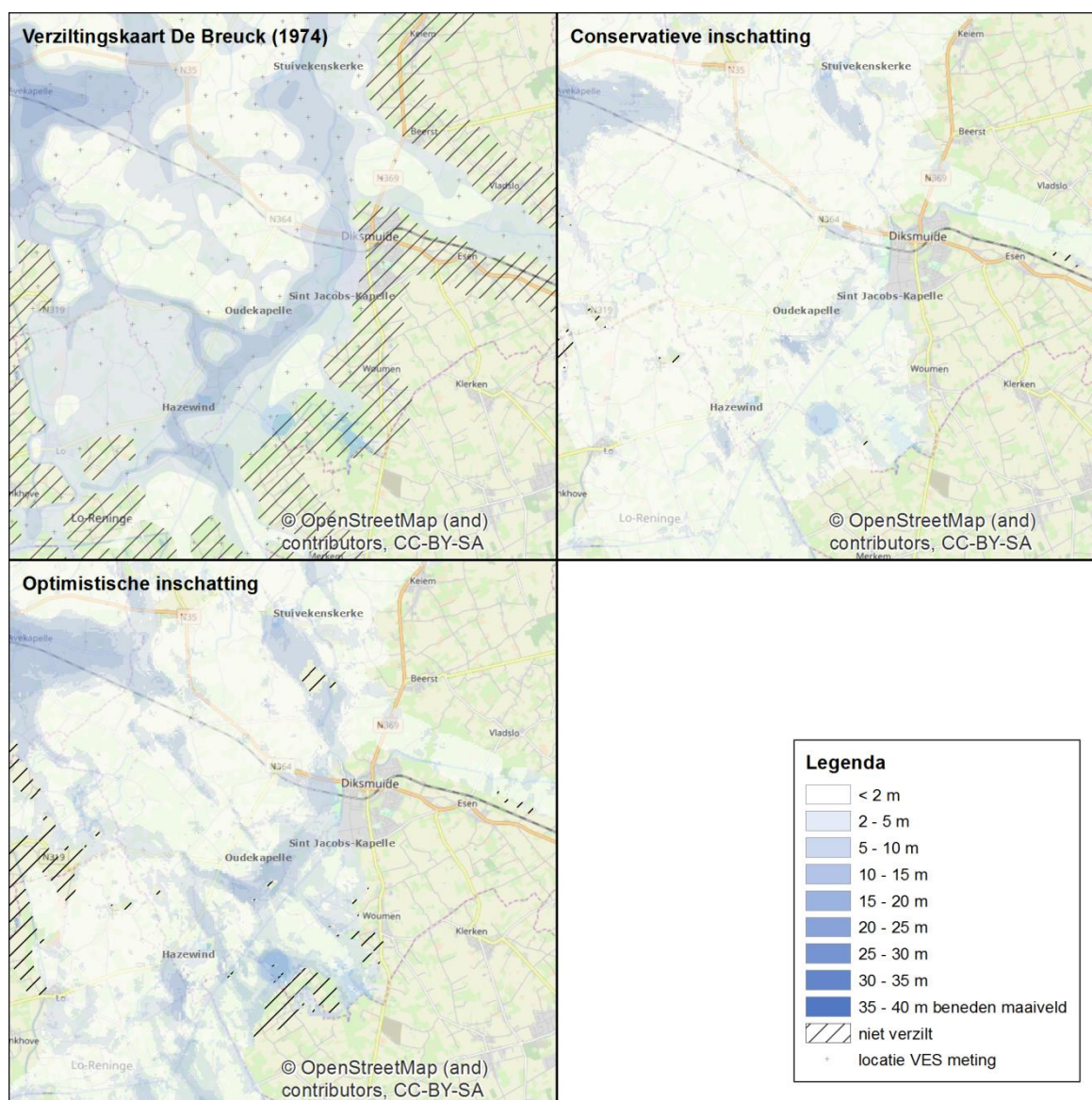
Volgens de recente survey strekt de lens onder de Avekapellekreek zich verder naar het noordwesten uit en sluit misschien rechtsreeks aan op een zoetwaterlens onder Wulpen. Ook situeert het centrum van de lens (diepste punt) zich eerder ten noordwesten van Avekapelle dan ten zuidoosten ervan.

Volgens de optimistische schatting zou het diepste punt van de Avekapellekreek zich ten westen van Avekapelle bevinden waar de lens ca 15 m dik is. Ten oosten van Avekapelle is de lens ca 12 m. De oostelijke uitloper van de Avekapellekreek zou ten westen van Pervijze een zoete lens bevatten (langsheen de oude A vaart) tot een diepte van ca 7 m. Naar het noordwesten loopt de Avekapellekreek nog zeker door tot 1 km ten noorden van de E40, maar daar stopt het opgemeten gebied. Het is daardoor niet geweten of de Avekapellekreek aansluit op de zoete lens van Wulpen.

Ongeveer 2 km ten zuiden van Avekapelle, iets ten zuiden van Eggewaartskapelle, komt ook een noordwest-zuidoost georiënteerde zoetwaterlens voor die minder diep is. Op de kaart van 1974 sluit deze via een slingerend verloop aan op de Avekapellekreek. Deze kreek loopt rondom een poelgrondplaat die zich uitstrekt tussen Avekapelle en Eggewaartskapelle, maar volgens de nieuwe survey (conservatieve schatting) bestaat deze aansluiting niet. De Eggewaartskapellekreeklens bevat volgens de conservatieve schatting zoet water tot 5 à 7 m diepte, is 2.5 km lang maar slechts ca 300 m breed. Volgens de bodemkaart zouden de kreekrugafzettingen hier evenwel over een breedte van 500 tot 600 m voorkomen. De optimistische schatting toont wel degelijk de aansluiting tussen de Eggewaartskapellekreeklens en de Avekapellekreeklens, en wat breder dan op de oude kaart, en geeft aan dat deze aansluiting op sommige plaatsen tot bijna 10 m zoet water zou bevatten.

11.3.7 Tussen Lo en Oudekapelle

Op de kaart van 1974 wordt hier een gebied aangegeven met het grensvlak tussen 2 en 5 m -mv. Het gebied wordt zuidoostelijk begrensd door de IJzerkreek, maar binnenin dit ca 5 km lange gebied is geen invloed van kleinere kreekruggen zichtbaar. Op de bodemkaart staat deze zone aangegeven onder de bodemserie "overdekte pleistocene gronden", behorende tot de Oudland polders. Smallere kreekruggen komen voor maar zijn mogelijk te klein om een merkbare invloed op de diepte van het zout grondwater te hebben. Volgens de AEM survey zit het grensvlak hier echter zeer ondiep, bijna steeds op minder dan 2 m -mv en zelfs vaak minder dan een meter beneden maaiveld. Op slechts enkele plaatsen zou het vlak iets dieper zitten, dan tussen de 2 en 3 m -mv. Er is ook geen visuele correlatie met de smallere kreekrugafzettingen die hier aanwezig zijn. Het tertiair substraat komt hier vrij ondiep voor en bestaat uit de Formatie van Tielt. Misschien heeft de lagere doorlatendheid van deze tertiaire afzettingen de ontwikkeling van zoetwaterlensen hier voorkomen.



Figuur 11.4 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) rond de IJzerkreek.

11.3.8 De IJzerkreekrug

Tussen Diksmuide en Lo-Reninge:

Ten zuidwesten van Diksmuide, iets ten zuiden van de lijn Lo-Reninge naar Diksmuide, komt een bredere strook kreekrugafzettingen voor die bekend staat als de "IJzerkreek". Op de kaart van 1974 staat hier een ca 6 km langwerpige noordoost-zuidwestelijke georiënteerde zoetwaterlens aangegeven waarin de diepte van het grensvlak zich tussen 10 en 15 m -mv zou bevinden. Net ten zuiden van Oudekapelle is er een vertakking naar het noordwesten, conform het voorkomen van kreekrugsedimenten.

De IJzerkreek wordt in de AEM Survey met de conservatieve schatting echter niet als een enkele smalle maar wel lange zoetwaterlens herkend. In de plaats worden slechts enkele, veel kleinere en lokale lenzen gedetecteerd. De belangrijkste lens bevindt zich op minder dan een km ten zuidoosten van Oudekapelle. De lens heeft een noordwest-zuidoostelijke oriëntatie, is

op zijn diepste punt bijna 15 m dik en is een kleine km lang maar slechts een 300 m breed. Een andere lens van vergelijkbare omvang en oriëntatie bevindt zich in Hazewind. Maar hier is de zoetwaterdikte maximaal een kleine 10 m. Dichter bij Diksmuide, in St-Jacobs-Kapelle komt een weinig diepe lens voor. Deze zou minder dan 5 m dik zijn en dus weinig zoet water bevatten.

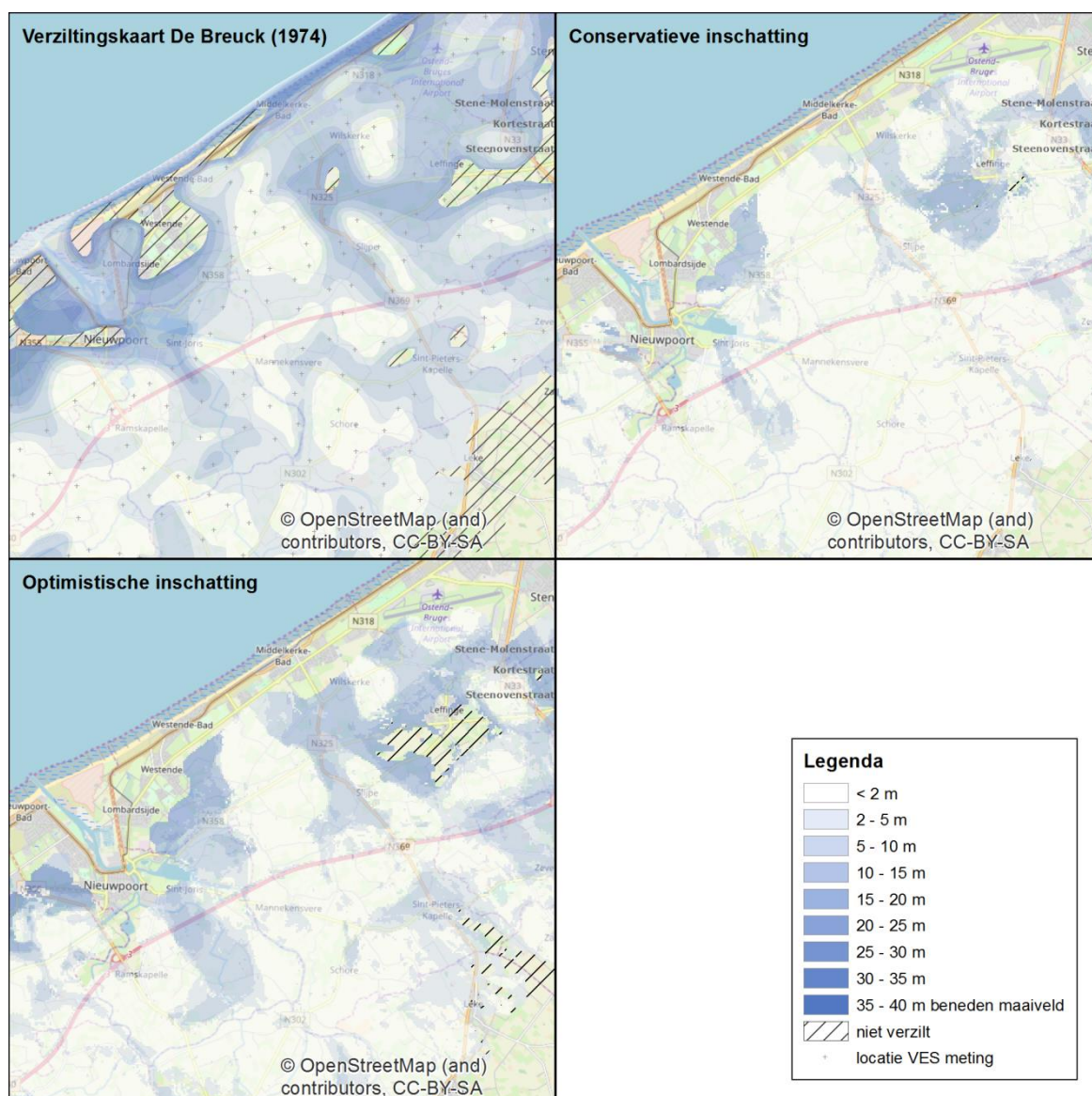
Met de optimistische schatting wordt voor het gebied tussen Diksmuide en Oudekapelle een goede overeenkomst tussen de oude en de nieuwe kaart gevonden. Volgens de nieuwe survey zijn de kreekafzettingen tot op 10 tot 12 m verzoet. Maar volgens de nieuwe survey loopt de verzoeting niet verder naar het zuidwesten door maar buigt naar het noordwesten af. Vandaar loopt een smallere zoete lens terug naar het zuidoosten. Deze is uitgediept tot 5 tot 10 m. Een lokale lens komt voor ten zuiden van Hazewind. Deze zou tot 15 m dik zijn maar niet verbonden zijn met de rest van de IJzercreek. Deze lens zou ca 1.5 km lang en 500 m breed zijn. Net ten westen van Diksmuide komt een lokale lens voor in de kreekrugafzettingen, maar de dikte is hier slechts een kleine 10 m.

11.3.9 Ten noorden van Diksmuide:

De kreekrug loopt nog verder door ten noorden van Diksmuide. De kaart van 1974 geeft hier ten zuidoosten van het gehucht Stuivekenskerke een kleine zoetwaterlens met een dikte van 10 tot 15 m. Deze lens is ca 800 m lang en heeft een noordoost-zuidwestelijke oriëntatie. Volgens de 2017 survey zou deze lens groter zijn maar een noordwest-zuidoostelijke oriëntatie hebben. Ze is minder diep, op het diepste punt een kleine 10 m, maar heeft wel een lengte van ruim 2 km en een breedte van ca 500 m. Volgens de optimistische schatting loopt de kreekrug nog 4.5 km verder door ten noorden van Diksmuide, in vergelijking met de oude kaart. De lens ten zuiden van Stuivekenskerke zou meer dan 10 m diep zijn. Ten noordoosten van Stuivekenskerke, in een bocht die de IJzer maakt, komen ook kreekrugafzettingen voor en is lokaal een zoetwaterlens ontwikkeld, maar deze zou slechts een 5 m diep zijn.

11.3.10 Omgeving Nieuwpoort

Op de 1974 kaart is er in Nieuwpoort, ten zuiden van het spaarbekken, een landinwaartse intrusie van een zoetwaterlens, die 15 tot 20 m dik zou zijn. Deze lens zou zich tot ca 2 km vanaf het spaarbekken uitstrekken. Ten oosten van Ramskapelle komen kreekrugafzettingen voor, het is hierin dat deze lens zich ontwikkeld heeft. Volgens de AEM survey zou deze lens slechts tussen 5 en 10 m dik zijn (conservatieve inschatting).



Figuur 11.5 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) ten oosten van Nieuwpoort.

11.3.11 Tussen Nieuwpoort en Oostende

Op de 1974 kaart staat er tussen Middelkerke en Oostende een lange, boogvormige zoetwaterlens aangegeven. Deze begint ten zuiden van Wilskerke, loopt dan oostelijk ten zuiden van Leffinge, tot aan de N33 en buigt dan naar het noorden af om tot in Oostende door te lopen. Deze lens is zeer diep, minstens 15 tot 20 m en op sommige plaatsen zou het grondwaterreservoir volledig verzoet zijn.

Tijdens de nieuwe survey kon het oostelijk deel van dit gebied niet opgemeten worden vanwege het vliegveld van Oostende en de stedelijke bebouwing dicht bij de stadskern. Het wel gekarteerde deel toont een overwegende verzoeting, met scherp afgelijnde zoute platen, overeenkomend met poelgronden.

De AEM survey (conservatieve schatting) toont een dikke zoetwaterlens ten zuidwesten van Leffinge, waar een lens van ca 2 bij 1.5 km zoet water voorkomt met een diepte tot max 18 m. Maar waar de 1974 kaart een doorlopen naar het oosten aangeeft wordt in de AEM survey hier ondiep zout water gevonden (op minder dan 2 m diepte). Het oostelijk deel van de 1974 lens, dat ten oosten van de N33 ongeveer noord-zuid loopt naar Oostende toe, wordt wel in de AEM survey gevonden, maar is dus gescheiden van het westelijk deel. Het deel ten noorden van de Steenhovenstraat ligt in de historische polders van Oostende.

Op de 1974 kaart staat zuidelijker nog een west-oost georiënteerde lens aangegeven, ongeveer het huidige tracé van de E40 volgend, ten zuiden van Snaaskerke. De oude kaart geeft hier een diepte van het verziltingsvlak van 10 tot 15 m, en is ontwikkeld omdat hier overdekte afzettingen voorkomen. Deze lens zit al dicht bij de grens van het poldergebied. De AEM survey wijst hier op 5 tot 10 m zoet water.

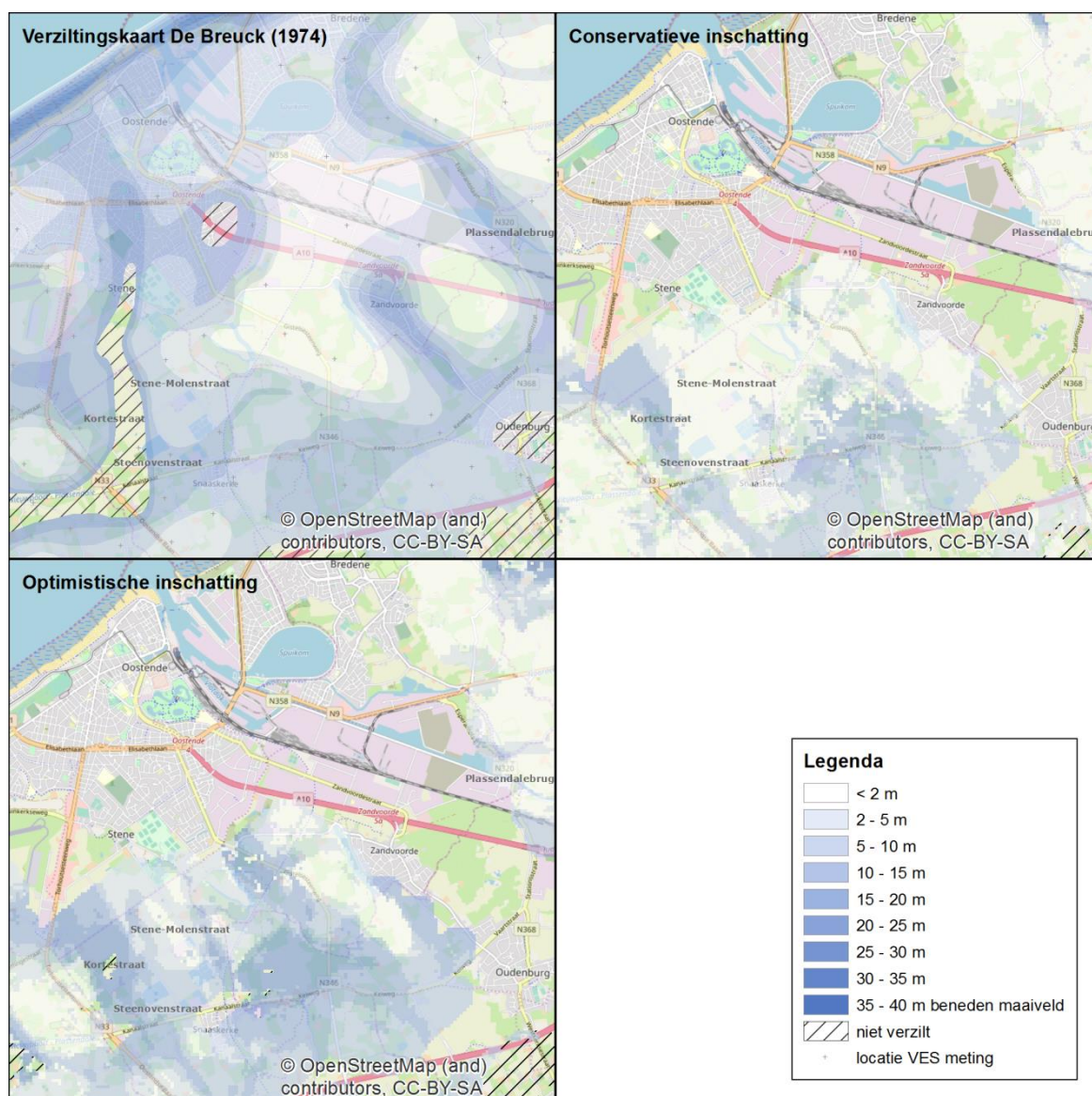
Net ten zuiden van het kanaal Plassendale-Duinkerke, ten oosten van Snaaskerke, vindt de AEM survey zoet water tot een diepte van 10 à 15 m (conservatief) en ca 15 m (optimistisch). Hier komen overdekte kreekrugafzettingen voor. Dit verzoet gebied sluit langs het noorden aan op de historische polders van Oostende.

11.3.12 Historische polders van Oostende

Ten zuidwesten van Oostende, ten noorden van het kanaal Plassendale-Duinkerke, liggen de historische polders van Oostende. De zuidgrens van de polder van Snaaskerke lag op wat nu de Steenovenstraat is. Hoewel dit gebied op de bodemkaart staat aangegeven onder de bodemserie "kleiplaatgronden" zijn hier blijkbaar toch zoetwaterlenzen ontwikkeld. Een westelijke lens begint in het zuiden net ten noorden van de Steenhovenstraat en loopt dan noordelijk tussen de Kortestraat en de Stene-Molenstraat. De lens loopt noordelijk tot een 300 m van de Schorredijk, maar verder noordwaarts zijn er geen resultaten in de AEM survey. Ten oosten van de Stene-Molenstraat komt ondiep zout water voor, maar nog verder oostwaarts, in de omgeving van de Gistelsesteenweg vindt de AEM survey een tweede zoet lens, die tot op 17 tot 18 m diepte (optimistische schatting) zou ontwikkeld zijn. Deze oostelijke lens staat niet aangegeven op de oude kaart.

Het ontstaan van deze lenzen is blijkbaar niet verhinderd geweest door de oppervlakkige polderklei. Beide kaarten geven hier een vergelijkbaar beeld ten westen van de Stene-Molenstraat, maar de recente survey toont geen zoet water ten oosten van deze straat.

Op de kaart van 1974 staat er in het zuidoosten van de polders van Oostende een langwerpige noord-zuid gerichte zoetwaterlens aangegeven die vanaf Zandvoorde in zuidelijke richting loopt. Deze zou ook tot een diepte van 15 à 20 m gaan. Maar voor dit gebied leverde de AEM survey geen resultaten op, zodat dit niet kan bevestigd worden.



Figuur 11.6 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) voor de historische polders van Oostende.

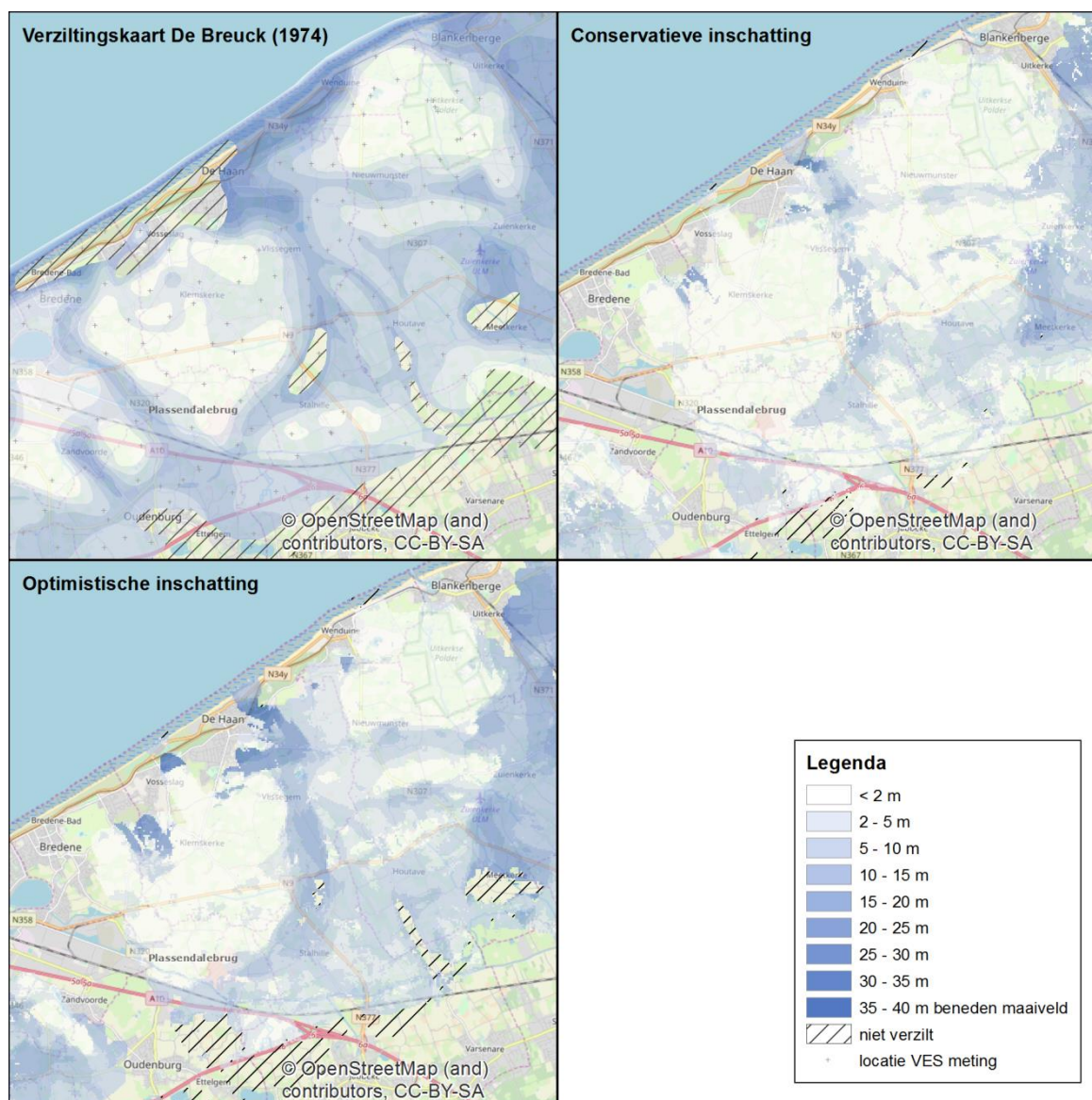
11.4 Deelgebied Centraal kustgebied (tussen Oostende en Zeebrugge)

11.4.1 Omgeving Klemskerke

Rondom Klemskerke komt de verzilting volgens de oude kaart zeer ondiep voor, meestal minder dan 2 m, ondanks het feit dat hier volgens de bodemkaart vooral kreekruiggronden voorkomen. Ook voor de nieuwe kaart, conservatieve schatting, is dit het geval. De optimistische schatting geeft hier ook overwegend een ondiep verziltingsvlak, met uitzondering van een strook ten westen van Klemskerke centrum waar het verziltingsvlak abrupt naar een diepte van meer dan 20 m zou springen. Dit lijkt echter weinig waarschijnlijk.

Volgens de oude kaart begint aan de kust in De Haan een landinwaartse zoetwaterlens die ten oosten van Vlissegem passeert, en landinwaarts doorloopt tot in Stalhille, waar het reservoir bijna volledig verzoet zou zijn. Deze zoetwaterlens loopt vandaar verder naar het westen, waar

ze vanaf Passendalebrug terug naar het noorden loopt. Aldus omsluit deze zoete gordel de verzilte regio rond Klemkerke. Deze circulaire boogvormige lens wordt in de nieuwe survey grotendeels terug gevonden, maar volgens de conservatieve schatting lokaal wel onderbroken door saliene upconingen. De lens heeft de grootste diepte tussen Vlissegem (in het noorden) en Stalhille (in het zuiden), en bereikt daar een dikte van 15 tot 20 m. Op de overige plaatsen is het zoet water tussen 5 en 10 m dik. Het westelijk deel van de zoete boog kon tijdens de AEM survey niet opgemeten worden. Tegen de landinwaartse poldergrens wordt ook zoet water gevonden, maar dat sluit aan bij het niet verzilte achterland en kan veroorzaakt zijn door zoet water dat vanuit het achterland de polders instroomt.



Figuur 11.7 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) voor deelgebied Centraal Kustgebied.

11.4.2 Tussen De Haan, Wenduine en Blankenberge
 Hier is de duingordel minder breed en is de zoetwaterlens meer beperkt, vooral tussen Wenduine en Blankenberge. Hier komt direct landinwaarts zeer ondiep zout water voor (<2 m

-mv), op de 1974 kaart loopt dit tot ca 4 km van de kust. Dieper in de polder toont de 1974 kaart de aanwezigheid van enkele zoetwaterlenzen, weliswaar met variabele dikte. Een eerste loopt van Nieuwmunster naar Zuienkerke en zou 10 tot 20 m dik zijn. Deze wordt door de AEM survey herkend, maar zou een dikte van slechts een 10 m hebben.

Rond Meetkerke zou een dikkere lens zitten die wel 25 m dik is, eventueel tot aan de basis van het reservoir. Verder naar de rand van de polders zou er terug ondiep zout water voorkomen, hoewel dit vlak naast het zoet achterland ligt. De nieuwe survey bevestigt de lens rond Meetkerke, met een dikte van ca 20 m en een grootte van ca 2.5 km bij 1 km (conservatieve schatting), of een dikte tot meer dan 20 m en een grootte van ca 3 km bij 1 km (optimistische schatting). In de conservatieve schatting loopt de lens minder dik (5 tot 10 m) ook naar het westen door, en van daar zuidwaarts naar de rand van het poldergebied. De lange, smalle lens tussen Nieuwmunster en Zuienkerke is minder uitgebreid en slechts ca 5 m dik. Deze is dus op de nieuwe kaart van weinig belang. Met de optimistische schatting loopt de lens verder naar het zuiden door dan de oude kaart aangeeft.

11.4.3 Tussen Blankenberge en Zeebrugge

Het poldergebied tegen Zeebrugge, tussen het Boudewijnkanaal en Uitkerke in het noorden en de brug van de N348 over het kanaal in het zuiden is volgens de 1974 kaart bijna volledig verzoet tot een diepte van minstens 20 m -mv. Het verzoet gebied is ca 7 km lang en 2 tot 3 km breed. Dat wordt ook bevestigd door de recente survey. Wel kon niet over heel deze zoete lens gevlogen worden vanwege de industriezones die er in aanwezig zijn.

11.5 Deelgebied Meetjesland

11.5.1 Westelijk deel (ten westen van Watervliet)

Op de oude verziltingskaart wordt in dit deel van het Meetjes een zoete bovenlaag van 10 tot 20 m dikte ingetekend, met uitzondering van een lange boogvormige zone van ondiep zout grondwater (grensvlak op < 2 m -mv). Deze begint ten westen van St Margriete, loopt eerst naar het zuiden tot aan de Blokkreek en dan verder zuidoostwaarts tot nabij de Boerekreek. De nieuwe survey toont dat deze verzilte zone niet zo continu is en eerder bestaat uit enkele geïsoleerde plaatsen met ondiep zout grondwater.

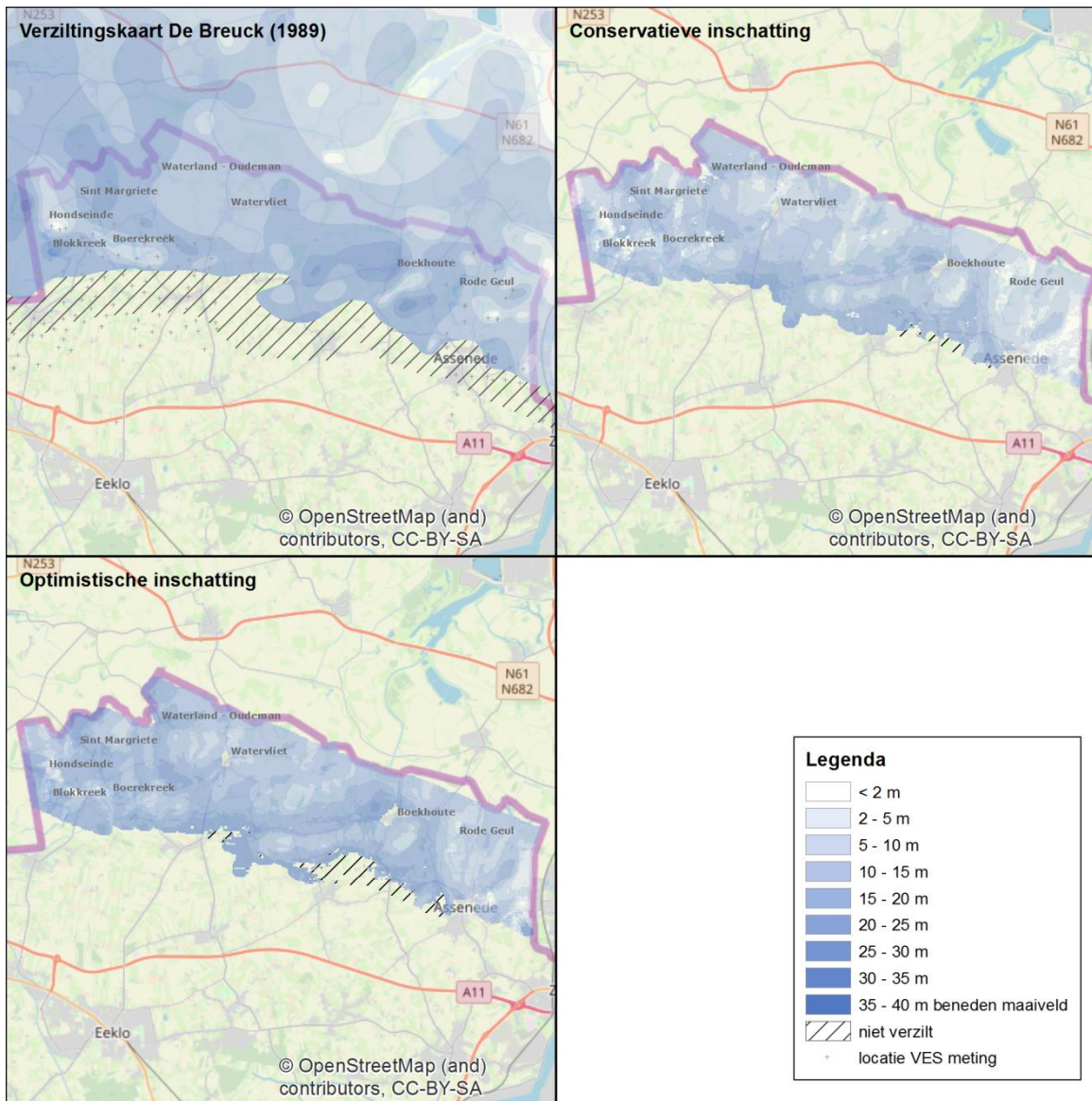
Voor de conservatieve schatting zijn dit:

- In het noordwesten langsheen de landsgrens wordt nu ondiepe verzilting gevonden terwijl hier in 1974 zoet grondwater tot op > 25 m -mv zou hebben voorgekomen.
- Ten noordoosten van de noordkant van de Hollandergatskreek, ten oosten van het gehucht Hondseinde
- In de Oude Haantjegatpolder (ten noordoosten van de Blokkreek)
- Ten noorden de de westkant van de Boerekreek
- In het noorden rondom Waterland-Oudeman
- Lokaal ten noorden van Watervliet

Met de optimistische schatting zijn de nog overblijvende geïsoleerde gebieden met ondiep zout water:

- Tussen St Margriete en de Hollandergatskreek komt er lokaal op minder dan 5 m diepte zout water voor.
- Rond het westen van de Boerekreek komt er ook ondiepe verzilting voor.

Buiten deze lokale opwellingen van de zoute onderlaag is er, zoals op de oude kaart, een zoete bovenlaag van 10 tot 20 m dikte aanwezig.



Figuur 11.8 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) voor deelgebied Meetjesland.

11.5.2 Centraal deel (tussen Watervliet en Boekhoute)

De oude kaart geeft in het centraal deel quasi overal een 10 tot 20 m dikke zoet bovenlaag. Ten westen van Boekhoute is er een zoete verdieping aanwezig waar meer dan 20 m zoet water voorkomt. Deze diepere lens wordt ook door de nieuwe survey bevestigd. Wel worden met de conservatieve schatting langsheen het Leopoldkanaal enkele lokale afwijkingen gevonden met ondiep zout water, maar misschien heeft de aanwezigheid van het kanaal de metingen hier beïnvloed.

11.5.3 Oostelijk deel (ten oosten van Boekhoute)

Ten oosten van Boekhoute komt volgens de 1974 kaart meer ondiep zout water voor. Ten zuiden van Boekhoute dorp begint een langwerpige zone, die naar het noorden loopt, ten oosten van Boekhoute passeert en tot aan de landsgrens doorloopt. Boven op de verzilte tong

hier zit er nog wel 5 tot 10 m zoet water. Deze upconing wordt wel herkend in de nieuwe survey, maar heel ondiep zout water komt hier niet voor; met de optimistische schatting zou het verziltingsvlak op minstens 6 m diepte zitten.

Meer ondiep zout water wordt door de AEM survey gevonden rond de Rode Geul en tussen deze kreek en de landsgrens. Op de 1974 kaart is deze upconing slechts heel lokaal, nu is het gebied duidelijk groter. Rond de Grote Geul wordt nu ook ondiep zout water gedetecteerd, dat was in 1974 niet het geval.

Ten oosten van de Vlietbeek staat op de oude kaart ook een opwelling van dieper zout water aangegeven, deze zone staat aangegeven als een westelijke uitloper van de ondiepe verzilting die langsheen de landsgrens voorkomt. De nieuwe survey situeert dit echter verder zuidwaarts als een noordoost-zuidwest gericht strook die vertrekt aan de landsgrens. Langsheen de landsgrens komen de oude en nieuwe kaart overeen: hier wordt ondiep zout water gevonden.

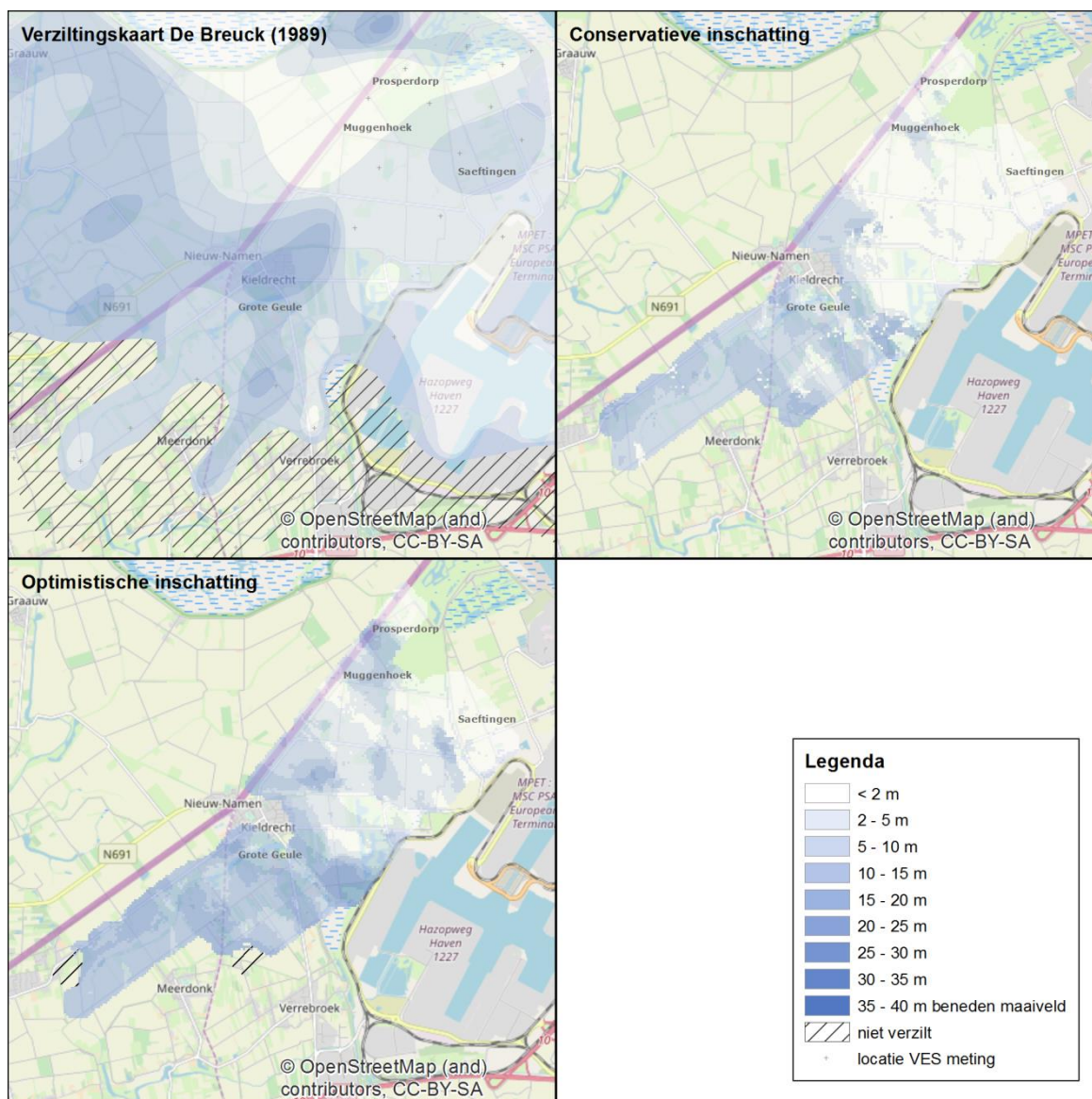
11.6 Deelgebied Linker Scheldeoever

11.6.1 Ten westen van Kieldrecht

De oude verziltingskaart gaf hier een zoute incursie, maar enkel ten westen van de "Grote Geule", een oude inbraakgeul. Hier zou zout water voorkomen onder een 5 tot 10 m dikke zoete bovenlaag. Errond werd toen geen verzilting vastgesteld. Tijdens de nieuwe survey wordt deze incursie niet herkend.

11.6.2 Omgeving Kieldrecht

Rond Kieldrecht dorp geeft de 1974 kaart een vrij grote zoetwaterlens met een diepte van 15 tot 20 m. In de AEM survey mocht niet boven Kieldrecht zelf gevlogen worden, zodat de huidige situatie in de dorpskern zelf niet gekend is. Wel wordt rondom Kieldrecht de aanwezigheid van een zoete bovenlaag vastgesteld. Deze heeft een variabele dikte van 5 tot ca 20 m.



Figuur 11.9 Verziltingskaart De Breuck (linksboven), conservatieve schatting AEM resultaat (rechtsboven) en optimistische schatting AEM resultaat (linksonder) voor deelgebied Linker Scheldeoever.

11.6.3 Ten oosten van Kieldrecht

Ten oosten van de dijk van Koningskieldrecht polder zit het verziltingsvlak vrij ondiep. Op de 1974 kaart wordt bijna overal een diepte tussen 2 en 5 m getekend. Enkel in het noordwesten langsheen de landsgrens zit het zout water nog ondieper, op minder dan 2 m -mv. In het noordoosten van het gevlogen gebied, in de Doelpolder, geeft de 1974 kaart een wat dieper grensvlak (5 tot 10 m).

De nieuwe survey geeft hier met de conservatieve schatting overal zeer ondiep zout water, meestal op minder dan 2 m. Er wordt slechts een enkele kleine zoetwaterlens gedetecteerd: in de Muggenhoek. Hier zou tussen 5 en 10 m zoet water zitten. Verder naar het noordoosten toe, naar Prosperdorp, wordt, zoals in 1974, geen zoet water gevonden. De optimistische schatting geeft een meer gevarieerd beeld met een afwisseling van zeer ondiep zout water (< 2 m -mv) met zoete lenzen die tot wel 15 m dik kunnen zijn maar een beperkte uitbreiding hebben. Dergelijke lenzen komen voor:

- In het noordwesten langsheen de landsgrens in Prosperdorp.
- Rond Saeftingen.
- In de Nieuw-Arenbergpolder (2 lenzen).

11.7 Kwantitatieve vergelijking verziltingskaarten

Een kwantitatieve vergelijking van de verziltingskaarten werd gedaan op basis van controlepunten waarvoor de positie van het verziltingsvlak wordt bepaald volgens de oude en nieuwe kaart. De oude kaart is opgesteld aan de hand van een discrete set van datapunten (VES metingen) waartussen geïnterpoleerd is. Deze interpolatie is manueel gedaan waardoor tussen de datapunten in een onzekerheid op het positie van het grensvlak ontstaat. Daarom is het aangewezen als controlepunten de locaties van de VES metingen zelf te gebruiken met de diepte van het grensvlak zoals bepaald uit het lagenmodel van de VES. Daarbij werd de resistiviteitswaarde van 6 ohmm gebruikt om een onderscheid te maken tussen niet-verzilte (> 6 ohmm) en verzilte (< 6 ohmm) lagen. De zoet/zout interface ligt dan op de lagenovergang. Vermits op de oude verziltingskaart de ligging van de gebruikte VES metingen niet staat aangegeven, is strikt genomen niet geweten welke metingen precies gebruikt zijn. Hier werd er van uit gegaan dat alle geïnterpreteerde VESsen ook effectief gebruikt zijn bij de kartering. VESsen waar geen verzilting werd herkend, kunnen uiteraard niet gebruikt worden bij de vergelijking. Het aantal controlepunten ligt daardoor lager dan het totaal aantal VES metingen dat beschikbaar is. In het kustgebied hebben de controlepunten een uniforme maar onregelmatige spreiding die gebiedsdekkend is, maar in het Meetjesland en de Scheldepolders zijn er kaartbladen waarvoor de VES data niet teruggevonden werden. Deze vergelijkingen steunen derhalve op minder puntgegevens, temeer daar deze deelgebieden kleiner zijn. Grafieken van deze vergelijking zijn opgenomen als bijlage C.

In de kustregio werden 616 puntgegevens gebruikt bij de vergelijking voor de conservatieve schatting, en 625 puntgegevens voor de optimistische schatting. Op de nieuwe kaart (conservatieve schatting) ligt het verziltingsvlak in bijna alle gevallen beduidend minder diep dan op de oude kaart; bij de optimistische schatting ligt het verziltingsvlak nog voor de meeste punten minder diep dan op de oude kaart. De gemiddelde diepte van het vlak is voor de conservatieve schatting 3.47 m t.o.v. 8.37 m op de oude kaart (Tabel 11.1), en voor de optimistische schatting 6.47 m t.o.v. 8.04 m op de oude kaart (Tabel 11.2). In het Meetjesland werd de vergelijking uitgevoerd op basis van 46 meetpunten. Hier is het verschil minder groot: de diepte ligt conservatief nu gemiddeld op ca 77% van die op de oude kaart (10.22 m op de nieuwe kaart tegenover 13.23 m op de oude kaart – Tabel 11.1); volgens de optimistische schatting is dit 14.17 m t.o.v. 13.23 m op de oude kaart (Tabel 11.2). In de Scheldepolders liggen slechts 9 VES metingen die gebruikt kunnen worden voor de vergelijking. Deze liggen conservatief in de lijn van wat in het Meetjesland wordt vastgesteld. Voor de optimistische schatting ligt het nieuwe grensvlak gemiddeld ruim 3 m dieper dan op de oude kaart, respectievelijk op 7.17 m tegenover op 4.04 m vroeger. Het aantal metingen is hier wellicht te beperkt om representatief te zijn voor het hele gebied.

Tabel 11.1 Vergelijking van de gemiddelde diepte (in m) van het grensvlak tussen controlepunten en AEM verziltingsvlak (conservatieve schatting) per deelgebied

Deelgebied	Kustgebied	Meetjesland	Linker Scheldeoever
Aantal VESsen	616	46	9
Oude diepte (m)	8.37	13.23	4.04
Nieuwe diepte (m)	3.47	10.22	2.99
Verskil (m)	-4.9	-3.01	-1.05
r ²	0.52	0.89	0.54

De kwantitatieve vergelijking toont voor de conservatieve schatting dat in de nieuwe kaart het verziltingsvlak systematisch minder diep zit dan op de oude kaart (Tabel 11.1). Dit fenomeen is het meest uitgesproken in de kustvlakte: hier ligt de interface gemiddeld op ca 35 tot 40% van de vroeger vastgestelde diepte. In het Meetjesland en de Scheldepolders is het verschil minder groot, maar ligt het verziltingsvlak gemiddeld ook wel hoger: de diepte op de nieuwe kaart bedraagt gemiddeld 65 tot 80% van die op de oude kaart. Op de grafieken (Bijlage C) is te zien dat zeker in het kustgebied de afwijkingen tussen beide kaarten niet normaal verdeeld liggen rond de 1:1 lijn, maar er vooral onder liggen. Er treedt m.a.w. een bias op: in het kustgebied bv ligt het zoet/zout grensvlak op de nieuwe kaart (conservatief) gemiddeld minder dan half zo diep als op de oude kaart.

Tabel 11.2 Vergelijking van de gemiddelde diepte (in m) van het grensvlak tussen controlepunten en AEM verziltingsvlak (optimistische schatting) per deelgebied

Deelgebied	Kustgebied	Meetjesland	Linker Scheldeoever
Aantal VESSen	625	46	9
Oude diepte (m)	8.04	13.23	4.04
Nieuwe diepte (m)	6.47	14.17	7.17
Vershil (m)	-1.57	0.94	3.13
r ²	3.43	3.67	4.13
Aantal VESSen	0.82	0.91	0.51

Voor de optimistische schatting toont de kwantitatieve vergelijking (Tabel 11.2) dat in de nieuwe kaart het verziltingsvlak:

- gemiddeld ca 1.5 m minder diep zit in het kustgebied
- gemiddeld ca 1 m dieper zit in het Meetjesland
- gemiddeld ca 3 m dieper zit in de Scheldepolders

De trend in het kustgebied (minder diep grensvlak) is (optimistische schatting) dus verschillend van die in het Meetjesland en de Scheldepolders (dieper grensvlak). De gemiddelde absolute verschillen liggen in de drie deelgebieden tussen de 3.5 en de 4 m en zijn dus vergelijkbaar (Tabel 11.2). Uit Tabel 11.2 is ook duidelijk dat het verziltingsvlak in het Meetjesland duidelijk dieper zit (14.17 m) dan in het kustgebied (6.47 m).

Het toeschrijven van de vastgestelde trends in het kustgebied en het Meetjesland aan fysische verschuivingen van het vlak tussen de twee karteringen in, dient met de nodige voorzichtigheid te gebeuren, ook al ligt er 40 tot 50 jaar tussen de VES meetcampagne van de oude kaart en de nieuwe AEM survey. De conclusies voor de Scheldepolders zijn mogelijk door het geringe aantal VES metingen niet representatief. In geval van een fysische verschuiving kan eerder verwacht worden dat er zowel verdiepingen als verhogingen van het grensvlak zouden optreden en de verschillen gelijkmatig zouden gespreid zijn boven en onder de 1:1 lijn (Bijlage C).

In Bijlage C zijn ook kaarten opgenomen waarin de diepteligging van het zoet-brak grensvlak is vergeleken tussen de conservatieve en optimistische schatting en de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989).

11.8 Conclusies vergelijking verziltingskaarten

Verschillen tussen de nieuwe en de oude verziltingskaart weerspiegelen niet noodzakelijk veranderingen in de zoet-zoutwater verdeling, maar kunnen eerder te wijten zijn aan het verschil in methodiek die gebruikt is bij het opstellen van de kaarten. De oude kaart is gebaseerd op puntgegevens van de werkelijke resistiviteit van de ondergrond waarbij tussen

de puntwaarden geïnterpoleerd is, en gecombineerd met secundaire informatie uit de bodemkaart. De nieuwe kaart geeft een spatiaal continu beeld (met uitzondering van enkele niet opgemeten of gestoorde zones) in functie van de diepte, maar levert pseudo-resistiviteiten op waarvan de precieze waarde ook afhangen van de gebruikte inversiemethodes en inherente smoothing van de bekomen parameterverdelingen. Hierdoor kan het resulterende grensvlak een andere betekenis hebben dan op de oude kaart en zijn kleine en/of lokale diepteverschillen mogelijk van weinig betekenis.

In de nieuwe survey werd met een hoge spatiale resolutie gemeten. Hierdoor is de laterale uitbreiding en precieze begrenzing van zoete lenzen en zoute upconingen meer in detail in kaart gebracht. Dit resulteert soms in lokale verschuivingen van zoete en/of zoute zones tussen de oude en nieuwe kaart, maar betekent niet dat deze ook in realiteit zouden veranderd zijn.

11.9 Vergelijking van de resultaten van de AEM survey met de 4 referentieprofielen

11.9.1 Referentieprofiel 1: De Panne – De Moeren

Dit profiel (Lebbe en Pede, 1986) loopt nabij de Belgisch-Frens grens doorheen de duingordel, het overdekt waddenlandschap, de oude duinen van Adinkerke en verder landinwaarts doorheen De Moeren (Figuur 11.10). Het kan vergeleken worden met de resultaten van vluchtlijn L306025 voor het tracé tot en met de oude duinen en met het noordelijk deel van vluchtlijn L306031 voor het tracé in De Moeren. De vluchtlijn loopt verder landinwaarts over het Plateau van Izenberghe.

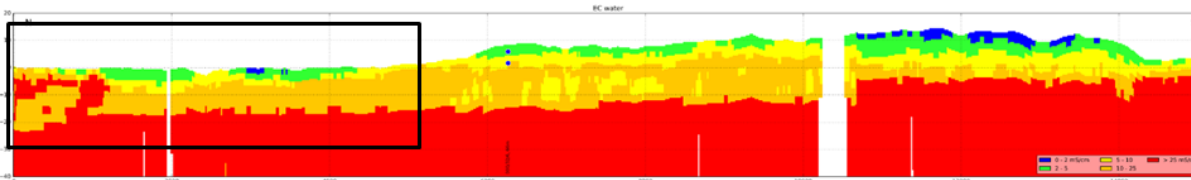
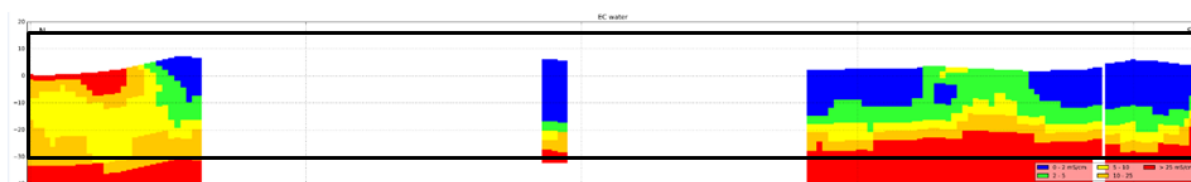
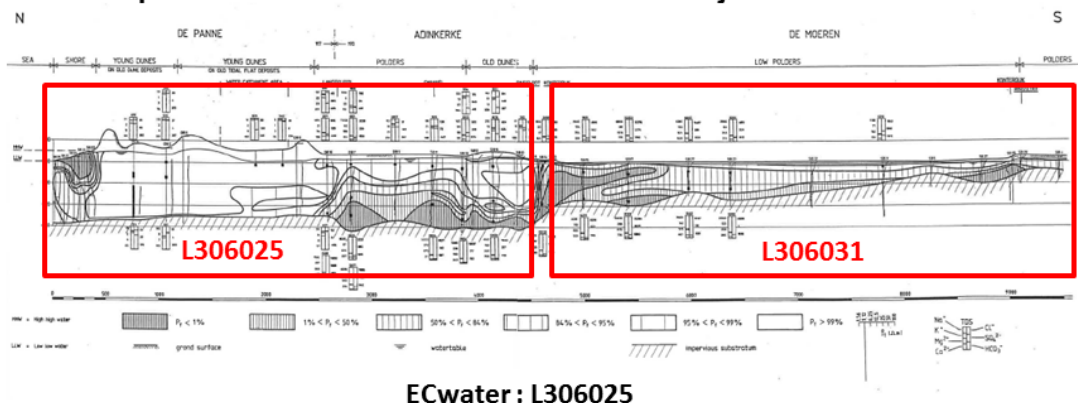
Het profielsegment van de AEM-vluchtlijn in de duinen heeft over ca 2 km echter geen resultaten opgeleverd. Het noordelijke eind ligt op de strandhelling en de AEM survey vindt hier wel de zoute grondwaterlens die zich bovenop meer brak grondwater ontwikkeld heeft, waarvoor infiltratie van zeewater tijdens de vloedfase van de getijdencyclus de drijvende kracht is (Vandenbohede en Lebbe, 2005). Volgens de AEM survey zou deze lens ook dikker zijn nabij de hoogwaterlijn wat overeenkomt met de bevindingen in loggings die op de strandhelling zijn uitgevoerd. Nabij de overgang tussen strand en duinen vindt de AEM het begin van de grote zoetwaterlens van de duingordel, maar dan volgt een ca 2 km brede strook waarin slechts op een enkele plaats resultaten bekomen werden. Deze ligt midden in de duingordel en wijst op een dikke zoetwaterlens die tot de basis van het freatisch grondwaterreservoir reikt. In het zuidelijke deel van vlieglijn L306025 werden wel resultaten bekomen. Dit segment ligt in het overdekt waddenlandschap, waar het bovenste deel van het freatisch grondwaterreservoir verzoet is, maar wel rust op een brakkere onderlaag. Deze brakkere onderlaag stijgt op rond de afwateringskanalen door opwaartse stroming. Dit is te zien in het uit AEM afgeleid ECwater profiel als een oprijzen van het 2 tot 5 mS/cm interval rond de 3.5 km markering. Ten zuiden hiervan komt de smalle oude duingordel van Adinkerke voor. Hier vindt de AEM de zoetwaterlens met een dikte van 10 tot 15 m, rustend op een wat brakkere onderlaag.

Vlieglijn L306031 begint in het noorden net ten zuiden van de oude duinen en doorkruist het laaggelegen gebied van De Moeren. Hier vindt de AEM op een enkel heel lokaal lensje na, geen zoet (< 2 mS/cm) grondwater. Wel wordt bovenaan het grondwaterreservoir een brakke (2 tot 5 mS/cm) bovenlaag van enkele meters dikte gedetecteerd die soms lokaal afwezig is. Daaronder neemt de saliniteit toe met de diepte.

Verder landinwaarts loopt vlieglijn L306031 boven het Plateau van Izenberghe. Door zijn hoge topografie (tot meer dan +10 m TAW) is dit plateau nooit overstroomd geweest en dus niet verzilt. Het behoort daardoor niet tot het studiegebied. Onder het plateau komt het tertiair substraat (vooral klei) zeer ondiep voor, op niet meer dan enkele meters diepte, waardoor het

zoete grondwater dat hier in de Quartaire deklaag aanwezig is, moeilijk door AEM te detecteren is. De AEM vindt hier daarom bovenaan brak grondwater, maar op het meest zuidelijke (dus landinwaartse) deel wordt toch een zoet bovenlaag herkend. Misschien is het Quartaire dek en de (uiteraard zoete) bovenste laag hier wat dikker.

Referentieprofiel 1 : De Panne - De Moeren : vluchtlijnen L306025 + L306031



Figuur 11.10 Referentieprofiel 1: LN-loggingprofiel en uit de AEM berekende ECwater verdeling

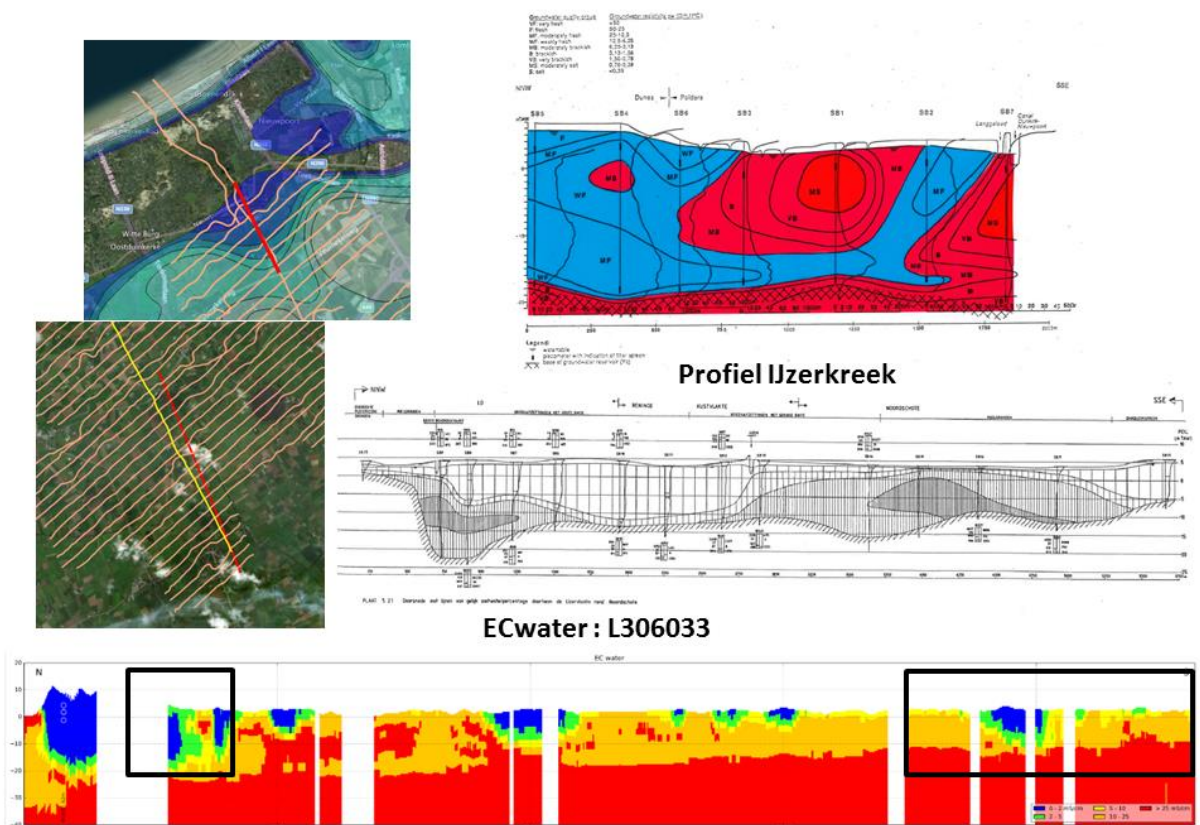
11.9.2 Referentieprofiel 2: Oostduinkerke

Het tweede referentieprofiel begint nabij Oostduinkerke en valt samen met vlieglijn L306033. Dit is een lange vlieglijn die landinwaarts tot nabij Reninge loopt, dat is ca 35 km van de kustlijn af. Langsheen deze lange vlieglijn zijn er twee secties waarvoor resistiviteitsprofielen bestaan die opgesteld zijn aan de hand van LN-loggings: een korte (ca 1750 m) sectie in het noorden tussen de duingrens en het kanaal Duinkerke-Nieuwpoort (Walraevens et al., 1993) en de tweede langere sectie (ca 5750 m) aan het landinwaarts einde van de vlieglijn (Zeuwts, 1991) (Figuur 11.11).

De zeewaartse sectie is interessant omdat hier een speciale stromingssituatie en saliniteitsdistributie voorkomt. Vanuit de duinen, waar het grondwaterreservoir tot het Tertiaire substraat verzoet is, komt er een zoetwater intrusie in het poldergebied voor als een zoete onderlaag die op een diepte van ca 15 m onder een brakke en lokaal zelfs saliene bovenlaag landinwaarts doorstroomt en tenslotte opwelt in de nabijheid van het kanaal waar het zoet grondwater wordt weggedraineerd. Het resistiviteitscontrast tussen de brakke boven- en zoete onderlaag is hier zeer groot is. Het LN profiel begint nog in de duinen maar hier leverde de AEM survey geen bruikbaar resultaat op. In het bekomen ECwater profiel is wel duidelijk te

zien dat de AEM survey de opwellende zoete tong naast het kanaal terugvindt, alsook de dikke zoetwaterlens op de duin-polder overgang. De connectie tussen beide wordt ingevuld via brak in plaats van zoet grondwater (tussen 2 en 5 mS/cm en lokaal tussen 5 en 10 mS/cm). Er boven bevindt zich veel zouter grondwater, zoals dat ook in de boorgatloggings (en ook wateranalyses) werd vastgesteld. Deze complexe saliniteitsdistributie wordt door de AEM goed herkend, al vormt ze slechts een beperkt deel van de hele vlieglijn.

Referentieprofiel 2 : Oostduinkerke vluchtlijn L306033



Figuur 11.11 Referentieprofiel 2: LN-loggingprofiel en uit de AEM berekende ECwater verdeling

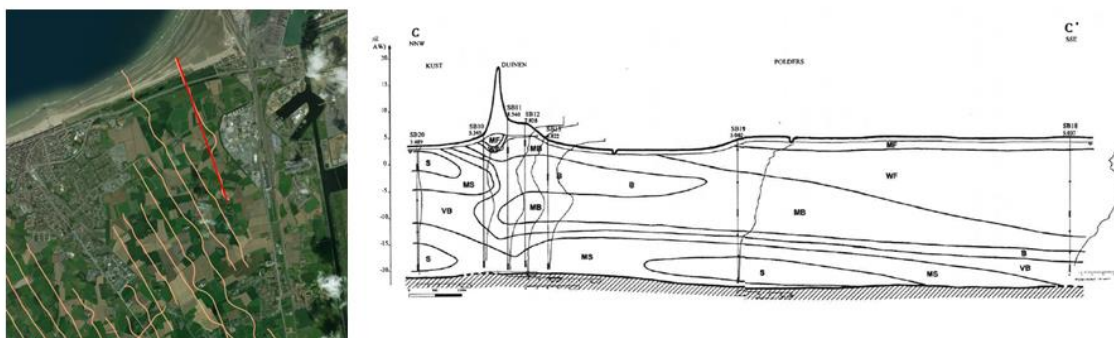
Het opgemeten resistiviteitsprofiel aan het landinwaartse einde van de vlieglijn loopt doorheen de IJzerkreek. Hier komen kreekrugafzettingen voor, vooral in het noordelijk deel van het 5.75 km lange profiel, die daar lokaal wel dik kunnen zijn. Deze behoren tot de "IJzerkreekrug". In het referentieprofiel (Zeuwts, 1991) werd een tamelijk dikke zoetwaterlens gevonden (TDS < 1000 mg/l en Cl < 100 mg/l). Waar de kreekrugafzettingen dunner zijn, komt een beperkte zoetwaterlens voor bovenop een brakkere onderlens en onder poelgronden komt enkel brak en zout grondwater voor. De AEM survey vindt enkel de zoete lens onder de dikke kreekrugsedimenten, maar met een meer beperkte laterale uitbreiding, toch lokaal wel een 10 m dik. In noordelijke richting wijken de tracés van de vlieglijn en het profiel steeds meer van elkaar af, dit kan mee bijdragen tot het verschil tussen beide opmetingen.

11.9.3 Referentieprofiel 3: Blankenberge

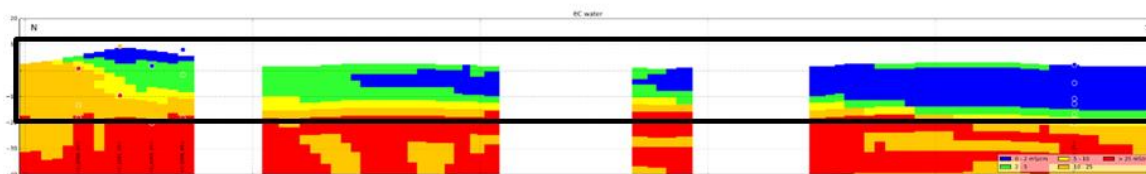
Het derde referentieprofiel (De Brueck et al., 1998) ligt voorbij Blankenberge, tegen Zeebrugge. Het opgemeten LN profiel valt volledig samen met vlieglijn L300101, dat is de meest noordoostelijke vlieglijn die in 2017 in het kustgebied gevlogen werd (Figuur 11.12). Het

interessante aan dit profiel is dat de duingordel heel smal is waardoor de duinzoetwaterlens heel beperkt van omvang en van diepte is. Meer zoet grondwater is landinwaarts in de polders te vinden waar een zoete wig voorkomt die verdikt en uitdiept naar het oosten toe. Aan het landwaartse einde van het profiel is het 25 m dikke freatisch grondwaterreservoir voor het grootste deel zelfs verzoet.

Referentieprofiel 3 : Blankenberge : vluchtlijn L300101



ECwater : L300101



Figuur 11.12 Referentieprofiel 3: LN-loggingprofiel en uit de AEM berekende ECwater verdeling

Zowel de vlieglijn als het profiel beginnen nog op de strandhelling. De AEM survey vindt onder de duinen zoet grondwater, al kan hier de aanwezigheid van een dikke onverzadigde zone ten minste deels de hogere bekomen resistiviteiten hebben veroorzaakt. Op de duin-polder overgang vindt de AEM survey brak grondwater (2 tot 5 mS/cm) wat ook zo werd vastgesteld in de loggings. Verder landinwaarts in de polder vindt de AEM survey zoet grondwater, eerst een dunnere lens onder een wat brakkere bovenlaag, dan verdikt de lens landinwaarts tot ze bijna heel het freatisch grondwaterreservoir opvult. Dat klopt zeer goed met de vaststellingen in de LN loggings.

11.9.4 Referentieprofiel 4: Assenede

Het vierde referentieprofiel (Walraevens et al., 1993) ligt in het Meetjesland, ten noordoosten van Assenede; het begint een kleine 2 km van de Nederlandse grens ten noordoosten van Boekhoute, loopt in zuidoostelijke richting en stopt ca 2.5 km ten oosten van het centrum van Assenede. Het valt samen met vlieglijn L600401 die evenwel iets langer is. In het Meetjesland is een groot deel van het freatisch grondwaterreservoir verzoet met een 10 tot 20 m dikke zoete bovenlaag bovenop brak grondwater, waarbij de brakke onderlaag nabij en rondom drainagesloten opwelt door de opwaartse stroming naar die grachten. Het zoet grondwater vormt op deze wijze zoete “pockets” tussen meer brakke sloten.

12 Discussie

12.1 Onzekerheden in de verschillende stappen in de methode

In alle stappen van de gevolgde methode is sprake van onzekerheden. De belangrijkste worden hieronder – per stap in de methode – toegelicht. De onzekerheden zijn niet gekwantificeerd, ze worden alleen kwalitatief toegelicht.

12.1.1 AEM survey

- Per meetpunt op een vlieglijn wordt een verticale kegelvormige conus opgemeten, waarbij met toenemende penetratiediepte de opgemeten parameter betrekking heeft op een steeds groter volume. Hierdoor worden scherpe overgangen uitgemiddeld. Dit effect neemt toe met de diepte.
- De metingen zelf zijn omgeven door ruis, door afwijkingen in de instrumenten, bewegingen van de helikopter, externe storingsbronnen et cetera. Hoewel veel zorg wordt besteed aan het verwijderen van dergelijke ruis, blijft hier een zekere, maar onbekende, meetonzekerheid over.

12.1.2 Inversie

- Inversie van AEM meetdata is een mathematisch ‘ill-posed’ probleem: er zijn meer onbekenden dan meetwaarden. Dat betekent ook dat oplossingen altijd niet-uniek zijn, meerdere verschillende oplossingen zullen even goed voldoen. Zonder extra gegevens is geen onderscheid te maken in de verschillende oplossingen. Dit is overigens niet beperkt tot AEM-surveys, ook de inversie van VES metingen heeft met dezelfde problematiek te maken.
- Om het inversieprobleem toch op te kunnen lossen, wordt het probleem op verschillende manieren behapbaarder gemaakt (regularisatie). Er worden bijvoorbeeld verbanden verondersteld door metingen die dicht bij elkaar liggen. In de huidige ‘state-of-the-art’ grootschalige inversietechniek, de Spatially Constrained Inversion, worden verbanden zowel verticaal, horizontaal langs de vlieglijn, als horizontaal naar andere vlieglijnen verondersteld.
- Deze verbanden zorgen voor een zekere mate van ‘smoothing’, waardoor scherpe transitie in de resistiviteitsverdeling gedeeltelijk worden uitgemiddeld. Maar daardoor is het ook onmogelijk scherpe transitie in de resistiviteitsverdelingen te bekomen. Het zoet-zout grensvlak zal daardoor in een geleidelijke overgangzone gelokaliseerd zijn. Door die uitmiddeling kan ook de dikte van de zoet-zout overgangzone niet accuraat bekomen worden.
- De verticale discretisatie in het inversiemodel. In het grid dat de inversiemethode gebruikt, neemt de dikte van de blokken (de “lagen” in het resistiviteitsmodel) toe met de diepte (Tabel 6.2). De dikte van de bovenste laag is 2 m en het grid omvat 30 lagen, wat tot een totale diepte van 150 m leidt. Op een diepte van 10 m zijn de lagen reeds bijna 2.5 m dik. Om zoet/zout overgangzones accuraat te kunnen terugvinden, zoals bijvoorbeeld in boorgatmetingen mogelijk is, zou de transitiezone in meerdere lagen moeten kunnen opgesplitst worden zodat de geleidelijke resistiviteitsverandering kan vastgesteld worden.
- Laterale discontinuïteit van lagen. Doordat overgangzones door de inherente smoothing verder worden verbreed, zorgt dit bij niet continue lagen niet alleen voor een uitgemiddelde overgang in verticale, maar ook in laterale zin. Om dit effect te beperken wordt horizontaal maar over een beperkte afstand verbanden verondersteld. Ook in de 3D interpolatie wordt hier expliciet rekening mee gehouden.

12.1.3 Van bulk resistiviteit naar grondwatersaliniteit

- De gebruikte omrekeningsformules van bulk resistiviteit (het resultaat van de inversie) naar grondwatersaliniteit zijn omgeven met een flinke onzekerheid. Dit is goed te zien in Figuur 7.3. De grote spreiding is te wijten aan verschillen tussen de met AEM afgeleide bulk resistiviteit (zie onzekerheden in voorgaande stappen) en de werkelijke bulk resistiviteit van de ondergrond, mogelijke afwijkingen in het lithologisch model (zie volgende punten), maar ook de optredende significante verschillen in elektromagnetische eigenschappen van sedimenten (Revil et al., 2017).
- Hoewel uiterste zorg is besteed aan het opstellen van de lithologische modellen van de studiegebieden, kunnen lokale discrepanties tussen de lithologische schematisering en de reële opbouw van de ondergrond voorkomen. In sommige delen van de studiegebieden zijn weinig boringen voorhanden of zijn de beschrijvingen te rudimentair om de opbouw van de ondergrond en het lithofacies op een betrouwbare wijze van af te leiden.
- De lithologische modellen zijn gebruikt om een onderscheid te maken tussen het voorkomen van grofkorrelige en fijnkorrelige sedimenten. Voor deze twee categorieën zijn aparte omrekeningsformules gebruikt om uit de opgemeten AEM resistiviteiten de grondwatergeleidbaarheid af te leiden. Waar er een verkeerde lithologie gebruikt wordt, zal ook de grondwatergeleidbaarheid verkeerd ingeschat worden. Als gevolg hiervan kan het grensvlak op een verkeerde diepte gepositioneerd worden. Waar er bijvoorbeeld ondiep meer klei aanwezig is dan het lithologisch model aangeeft, zal de AEM survey vrij lage resistiviteiten opmeten (vanwege de klei), maar zal door gebruik van de omrekeningsformule voor zanden (wegens de discrepantie tussen het lithologisch model en de realiteit) de lage resistiviteit toegeschreven worden aan hoge waterconductiviteiten en resulteren in de aanwezigheid van ondiep brak grondwater. Hierdoor zal de positie van het 2 mS/cm vlak op die plaats als zeer ondiep worden berekend. Als dit gebeurt waar het bovenste deel van het freatisch grondwaterreservoir verzoet is, zowel in de bovenste kleilaag als in het onderliggende zandpakket, treedt mogelijk een groot verschil in diepte op tussen de juist en verkeerd gekarteerde zones.

12.1.4 Interpolatie tot 3D resultaat

- Voor locaties waar geen AEM meetgegevens beschikbaar zijn, worden deze ingevuld met interpolatie. De interpolatie houdt zo goed mogelijk rekening met de ruimtelijke structuur in de gegevens, en probeert daarmee de missende gegevens zo goed mogelijk in te vullen. De onzekerheid neemt toe met toenemende afstand tot beschikbare gegevens, en is groter bij grote variatie in de beschikbare gegevens.
- Kruisvalidatie gaf een gemiddelde absolute fout door de interpolatie van tussen de 0.2 en 0.4 klassen (bij 5 klassen).

12.2 Hoe goed is het resultaat?

Hoewel de bijdrage van deze verschillende onzekerheidsbronnen niet is bepaald en gekwantificeerd, is de uiteindelijke onzekerheid van het eindresultaat vast te stellen door vergelijking met onafhankelijke meetgegevens.

Uit deze validatie (Hoofdstuk 9) blijkt:

- Als 'AEM conservatief' zoet voorspelt, is 95% grondwater analyses ook zoet
- Als 'AEM optimistisch' zoet voorspelt, is 89% grondwater analyses ook zoet
- Als het AEM resultaat zout voorspelt, is 81% van de grondwater analyses ook zout

- Het midden van de overgangszone tussen zoet en zout komt gemiddeld goed overeen met grondmetingen, maar absolute afwijkingen bedragen gemiddeld 2.5 m. Dit is ongeveer de verticale resolutie van het AEM resultaat.
- De bovenkant van de overgangszone tussen zoet en zout wordt gemiddeld 0.8 m te ondiep ingeschat, absolute afwijkingen zijn gemiddeld 1.8 m. Dit is ongeveer de verticale resolutie van het AEM resultaat.

Verder is gebleken dat:

- Het AEM resultaat komt goed overeen met de vier geanalyseerde referentieprofielen
- Patronen in het AEM resultaat komen veelal goed overeen met de verziltingskaart van De Breuck.
- Zoetwatervoorkomens in het AEM resultaat zijn scherper begrensd.
- Het AEM conservatief zoet-brak grensvlak ligt in het algemeen ondieper dan de verziltingskaart van De Breuck, dit is met name het geval in kreekruigen. Voor het AEM optimistische grensvlak is de diepte van het zoet-brak grensvlak ongeveer gelijk aan de verziltingskaart van De Breuck. Het AEM optimistische grensvlak is in het kustgebied gemiddeld wat ondieper dan de verziltingskaart van De Breuck, in het Meetjesland en de Linker Scheldeoever juist gemiddeld wat dieper.

13 Conclusies en aanbevelingen

13.1 Conclusies

In juli 2017 is een uitgebreide AEM survey uitgevoerd in de deelgebieden Westelijk kustgebied, Centraal kustgebied, Meetjesland en Linker Scheldeoever. In totaal zijn 2374 lijnkilometers gevlogen. De AEM meetgegevens zijn met behulp van Spatially Constrained Inversion geïnverteerd tot een bulk resistiviteitsbeeld op de vlieglijnen. Dit bulk resistiviteitsbeeld is gecombineerd met de eerder gevlogen survey in het Oostelijk kustgebied (Schaars, 2014; Vandeveld et al., 2014; VMM, 2016).

Van de deelgebieden Westelijk en Centraal kustgebied, Meetjesland en Linker Scheldeoever is een nieuw lithologisch model opgesteld. Daarnaast is een uitgebreide database samengesteld met relevante grondmetingen in het projectgebied. Hiervoor zijn ondermeer 1187 VES metingen en 375 boorgatmetingen, beschikbaar in het archief van UGent-LTGH, gedigitaliseerd, en aangevuld met chlorideanalyses uit 1045 verschillende peilbuizen.

Het verkregen bulk resistiviteitsbeeld is met behulp van afgeleide relaties per lithologie vertaald in grondwatersaliniteit. Met behulp van een speciale vorm van indicator kriging is een driedimensionaal voxelmodel van grondwatersaliniteit gerealiseerd, met voxels van 50x50x0.5 m3. Dit voxelmodel bestrijkt ruim 800 km2.

Om rekenschap te geven van de onzekerheden in de methode, is zowel een conservatief, als een optimistisch beeld opgesteld van de aanwezige zoetwatervoorraad.

De conservatieve en optimistische schatting van zoet grondwater in het 3D resultaat komen zeer goed (voor respectievelijk 95% en 89%) overeen met grondwateranalyses. Zout grondwater wordt in 81% van de gevallen juist voorspeld. De overeenkomst voor brak grondwater is minder goed. De bovenkant van de overgangszone tussen zoet en zout ligt in het AEM resultaat gemiddeld minder dan een meter ondieper dan in beschikbare grondmetingen, het midden van deze overgangszone wijkt gemiddeld niet af van de grondmetingen.

De nieuwe kartering van het zoet-brak grensvlak is uitgebreid vergeleken met de verziltingskaart van De Breuck et al. (1974, 1989). Patronen, bijvoorbeeld de verbreiding van kreekruggen, komen goed overeen tussen het AEM resultaat en de verziltingskaart van De Breuck et al. 1974, 1989). Zoetwaterlenzen zijn evenwel in de conservatieve schatting stelselmatig ondieper dan in de verziltingskaart van De Breuck. Voor het AEM optimistische grensvlak is de diepte van het zoet-brak grensvlak ongeveer gelijk aan de verziltingskaart van De Breuck. Het AEM optimistische grensvlak is in het kustgebied gemiddeld wat ondieper dan de verziltingskaart van De Breuck, in het Meetjesland en de Linker Scheldeoever juist gemiddeld wat dieper. Uit optredende verschillen kunnen geen verziltings- of verzoetingstrends worden afgeleid, hiervoor verschillen de methoden waarmee de kaarten zijn afgeleid te veel. Zoet-zout patronen in de vier referentieprofielen komen goed overeen met het AEM resultaat.

Het uitgevoerde onderzoek resulteert hiermee in een zeer bruikbare nieuwe kartering van de diepte van het zoet-brak grensvlak. In vergelijking met de bestaande verziltingskaart van De Breuck is er nu een 3D voxelmodel beschikbaar gekomen van de elektrische geleidbaarheid van het grondwater, met een zeer hoog detailniveau. De nieuwe kartering laat door de sterk

toegenomen meetdichtheid duidelijk meer lokale details zien. De nieuwe kartering geeft ook aanwijzingen voor zoeter grondwater onder zout grondwater (bijvoorbeeld bij referentieprofiel 2), en geeft nieuwe inzichten over de ligging van zoetwaterlenzen. Een voorbeeld is de continuïteit van de Avekappellekreek.

De nieuwe kartering is een basisbestand voor de zoektocht naar een verbeterde zoetwatervoorziening in het freatisch grondwatersysteem. Hiervoor worden in deelopdracht 4 van dit project geschikte pilootlocaties gezocht. Daarnaast is de kartering goed bruikbaar voor het bepalen van de nul-toestand bij beoogde veranderingen, als beginconditie in grondwatermodellen die effecten van bijvoorbeeld klimaatverandering, zeespiegelstijging of maatregelen beschrijven, of als vertrekpunt voor vergunningverlening.

13.2 Aanbevelingen

We doen de volgende aanbevelingen voor verder onderzoek:

13.2.1 Toepassing van de FRESHEM resultaten

- Onderzoek naar opgetreden trends in verzilting danwel verzoeting. Door methodologische verschillen zijn uit de vergelijking tussen de verziltingskaart van De Breuck en het AEM resultaat geen harde conclusies te trekken over opgetreden verziltings- of verzoetingsprocessen. Het optreden van verziltings- of verzoetingstrends, en de oorzaken die deze trends veroorzaken, moet nader worden onderzocht. Er kunnen dan uitspraken worden gedaan over de duurzaamheid van de huidige zoetwatervoorraden, en over de belangrijkste invloeden op verzilting van het freatische grondwater. Voor onderzoek naar trends zijn (conceptuele) grondwatermodellen zeer geschikt, in combinatie met de gereedgekomen verziltingskartering.
- Herhalen van de AEM survey na verloop van tijd (bijvoorbeeld in 2040), mogelijk alleen in specifieke deelgebieden. Opgetreden verzilting of verzoeting kan met metingen worden aangetoond wanneer de AEM survey na verloop van tijd wordt herhaald. Omdat verziltingsprocessen normaal gesproken slechts langzaam verlopen, kan de AEM survey bijvoorbeeld elke twintig jaar worden herhaald.
- Mogelijk herzien van het VMM monitoringsnetwerk om lokaal trends in verzoeting of verzilting vast te leggen aan de hand van de AEM resultaten. De AEM resultaten geven nieuwe inzichten in waar monitoring gewenst is. Verziltingsprocessen verlopen langzaam, behalve als er veranderingen optreden aan het oppervlak of in de ondergrond. Het kan hierbij gaan om veranderingen in peil, verdieping van waterwegen, verhoging of verlaging van het land of grondwateronttrekkingen of infiltratie. Op die locaties kan de nieuwe kartering ondersteunend zijn aan een herziene inrichting van het monitoringsnetwerk, en uitbreiding met bijvoorbeeld SlimFlex metingen.
- Inschatting van effecten van veranderingen in bijvoorbeeld klimaat, landgebruik, en verschillende maatregelen op de zoete grondwatervoorkomens kunnen worden bepaald met een 3D dichtheidsafhankelijk grondwatermodel. Uitkomsten van dergelijke modellen worden sterk bepaald door de huidige verdeling van zoet en zout grondwater (bijvoorbeeld Vandenbohede en Lebbe, 2002; Lebbe et al., 2012). Het AEM resultaat is erg geschikt om als initiële conditie te worden toegepast in dergelijke grondwatermodellen (zie bijvoorbeeld Faneca Sanchez et al., 2012). Het desbetreffende grondwatermodel kan ook weer gebruikt worden om in een eventuele nieuwe AEM survey de focus te leggen op die deelgebieden in het grondwaterreservoir waar de snelheid van verzilten en verzoeten het grootst is.
- Kansen identificeren voor gebruik van de ondiepe ondergrond voor de zoetwatervoorziening van de agrarische sector. In deelopdracht 4 van deze studie (TOPSOIL: GO-FRESH Vlaanderen) wordt het resultaat van de eerste deelopdrachten

gebruikt om kansenkaarten te maken voor diverse maatregelen zoetwatervoorziening. De producten die hiervoor gebruikt worden zijn de nieuwe kaart met ondiepe zoetwatervoorkomens en de lithologische kartering. Vervolgens wordt samen met enkele ondernemers toegewerkt naar ontwerpen voor de pilootstudies. Voor deze stap zijn de hoge resolutie resultaten op de vlieglijnen erg waardevol. De combinatie van de verschillende producten is erg geschikt om lokaal een eerste haalbaarheidsstudie uit te voeren naar maatregelen die de zoetwater beschikbaarheid kunnen verbeteren.

- Ontwerpen in en met de ondergrond. Deze kartering maakt drie-dimensionaal inzichtelijk wat er in de ondergrond zit. Door goede uitleg bij en communicatie over deze studie kan voor andere sectoren inzichtelijk worden waar rekening mee gehouden moet worden (bv. bescherming van zoetwaterlenzen) maar ook welke kansen de ondergrond biedt voor drinkwater, agrarisch watergebruik, industrie en natuurontwikkeling.

13.2.2 AEM survey

- Gedetailleerd geologisch onderzoek naar opbouw van de ondiepe ondergrond. Het verwerken van de bestaande boorgegevens tot een gedetailleerd lithologisch model biedt de mogelijkheid om de bijdrage van de lithologie in de bulk geleidbaarheid preciezer uit het resultaat te filteren. Het GeoTop model in Nederland (Stafleu et al., 2013) zou als een voorbeeld kunnen dienen.
- Karakterisatie van oppervlaktegeleidbaarheden van in Vlaanderen voorkomende sedimenten in het laboratorium, inclusief Tertiaire kleilagen. Verschillende sedimenten hebben een verschillende oppervlaktegeleidbaarheid, en kennen daarmee een verschillende relatie tussen bulk geleidbaarheid en saliniteit van het grondwater. Karakterisatie van de Vlaamse sedimenten geeft een betere uitsplitsing van de bijdrage van lithologische verschillen in de gemeten bulk geleidbaarheid.
- Kwantificering van onzekerheden door uitgebreide Monte Carlo analyse. In het huidige resultaat is niet bekend hoe de onzekerheid in dit resultaat ruimtelijk varieert. Met behulp van een Monte Carlo analyse, waarin de verschillende onzekerheidsbronnen worden meegenomen, kan de onzekerheid ruimtelijk worden gespecificeerd (Delsman et al., 2018; Van Baaren et al., 2018).
- In de resultaten van de AEM survey zijn enkele gebieden met mogelijk brak grondwater geïdentificeerd, waar geen mariene transgressie heeft plaatsgevonden. Een voorbeeld hiervan is het Plateau van Izenberge, of langs de oostelijke rand van het studiegebied. Met conceptuele modellen kan worden verkend wat de oorzaak is van de gevonden metingen. Heeft er op een of andere manier toch menging van zoet en zout grondwater plaatsgevonden, of zijn de metingen hier om een bepaalde reden minder betrouwbaar.

14 Referenties

Archie, G., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. AIME* 146, 54–62.

Van Baaren, E.S., Delsman, J.R., Karaoulis, M., Pauw, P.S., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., Dabekaussen, W., Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Siemon, B., Steuer, A., Meyer, U., 2018. FRESHEM Zeeland - FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland, Deltares report 1209220. Utrecht, Netherlands.

Baeteman, C. 1999. The Holocene depositional history of the IJzer palaeovalley (Western Belgian coastal plain) with reference to the factors controlling the formation of intercalated peat beds. In: Baeteman, C. (ed.) (1999). *Quaternary of Belgium: New perspectives*. *Geologica Belgica* 2, 1-2: 39-72.

Baeteman, C., Scott, D.B. & Van Strydonck, M., 2002. Changes in coastal zone processes at a high sea-level stand: a late Holocene example from Belgium. *Journal of Quaternary Science* 17 (5-6): 547-559.

Baeteman, C. & Declercq, P-Y., 2002. A synthesis of early and middle Holocene coastal changes in the Belgian lowlands. *Belgeo* 2: 77-107.

Baeteman, C., 2005. The Streif classification system: a tribute to an alternative system for organising and mapping Holocene coastal deposits. *Quaternary International* 133-134: 141-149.

Baeteman C, 2005. Geologische kaart van België 1/25.000. Profieltypenkaart van de Holocene kustafzettingen. De Panne-Oostduinkerke, Nieuwpoort-Leke, Middelkerke-Oostende. Belgische Geologische Dienst, Brussel.

Baeteman C, 2008. De Holocene geologie van de Belgische kustvlakte. Geological Survey of Belgium Professional Paper 2008/2 – N.304.

Bertrand, S. & Baeteman, C., 2005. Sequence mapping of Holocene coastal lowlands. The application of the Streif classification system in the Belgian coastal plain. *Quaternary International* 133-134: 151-158.

Bogemans, F., Roe, H.M. & Baeteman, C., 2016. Incised Pleistocene valleys in the Western Belgium coastal plain: Age, origins and implications for the evolution of the Southern North Sea Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 456, p 46–59.

Bossu J, 1982. Vlaanderen in oude kaarten – drie eeuwen cartografie. Lannoo.

De Breuck, W., De Moor, G., Maréchal, R. & Tavernier, R., 1974. Diepte van het grensvlak tussen zoet en zout water in de freatische laag van het Belgische kustgebied (1963-1973). *Verziltingskaart*. Brussel, Militair Geografisch Instituut.

De Breuck, W., De Moor, G., Maréchal, R. & Tavernier R., 1989. Diepte van het grensvlak tussen zoet en zout water in de freatische watervoerende laag van noordelijk Vlaanderen (1974-1975).

De Breuck, W., Walraevens, K. Naert, E., Martens, K., Beeuwsaert, E. & Van Camp, M., 1998. Fresh/salt Water Distribution and Role of the Dune Ponds in Blankenberge-Zeebrugge (Belgian Coastal Plain). SWIM 15, Gent, 1998. Proceedings. pp. 271-285.

Delsman, J., Van Baaren, E.S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karaoulis, M.C., Pauw, P., Vermaas, T., Bootsma, H., De Louw, P.G.B., Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Steuer, A., Meyer, U., Revil, A., Oude Essink, G.H.P., 2018. Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. Environ. Res. Lett. 13, 084011.

Deutsch, C.V., 1994. Kriging with strings of data. Math. Geol. 26(5), 623–638.

Faneca Sánchez, M., Gunnink, J.L., Van Baaren, E.S., Oude Essink, G.H.P., Siemon, B., Auken, E., Elderhorst, W., De Louw, P.G.B., 2012. Modelling climate change effects on a Dutch coastal groundwater system using airborne electromagnetic measurements. Hydrol. Earth Syst. Sci. 16, 4499–4516.

Farasyn D, 2006. De Historische Polders van Oostende, 1584-1810. Oostendse Historische Publicaties 15, Stadsarchief Oostende.

Fofonoff, N.P., Millard, R.C., 1983. Algorithms for computations of fundamental properties of seawater, UNESCO Technical Papers in Marine Science 44. UNESCO Division of Marine Sciences, Paris.

Goovaerts, P., 2006. Geostatistics for natural resource evaluation. Oxford University Press, New York.

Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M., 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 p.

King, J., Oude Essink, G.H.P., Karaolis, M., Siemon, B., Bierkens, M.F.P., 2018. Quantifying inversion algorithms using airborne frequency domain electromagnetic data – applied at the Province of Zeeland, the Netherlands. Water Resour. Res. 2060, 1–22. doi:10.1029/2018WR023165

Lebbe, L. en Pede, K. (1986) Salt-fresh water flow underneath old dunes and low polders influenced by pumpage and drainage in the western Belgian coastal plain. 9th Salt Water Intrusion Meeting, 1986, Delft. Proceedings.

Lebbe, L., Oude Essink, G.H.P., Janssen, G., Courtens, C., Vandenbohede, A., 2012. SCALDWIN: Analyse grensoverschrijdende verzilting grondwater in het poldergebied van de provincies Oost-Vlaanderen, West-Vlaanderen en Zeeland, Deltares rapport 1202391.

De Louw, P.G.B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B.R., Gunnink, J.L., van Baaren, E.S., Oude Essink, G.H.P., 2011. Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15, 3659–3678.

Maas, E., Hoffman, G., 1977. Crop Salt Tolerance - Current Assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* 103, 115–134.

Mathys M, 2009. The Quaternary geological evolution of the Belgian Continental Shelf, southern North Sea. Ph.D. thesis, UGent.

Meyus, Y., Batelaan, O., De Smedt, F., 2000. Concept Vlaams Grondwater Model (VGM) - Hydrogeologische Codering van de Ondergrond van Vlaanderen (HCOV). Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde, Vrije Universiteit Brussel.

De Moor, G., De Breuck, W., 1969. De freatische waters in het Oostelijk Kustgebied en in de Vlaamse Vallei. *Natuurwetenschappelijk Tijdschr.* 51, 3–68.

Oude Essink, G.H.P., Van Baaren, E.S., De Louw, P.G.B., 2010. Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resour. Res.* 46, 1-16. doi:10.1029/2009WR008719

Patnode, H.W., Wyllie, M.R.J., 1950. The presence of conductive solids in reservoir rocks as a factor in electric log interpretation. *Pet. Trans. AIME* 189, 47–52.

Pauw, P.S., De Louw, P.G.B., Oude Essink, G.H.P., 2012. Groundwater salinisation in the Wadden Sea area of the Netherlands: quantifying the effects of climate change, sea-level rise and anthropogenic interferences. *Netherlands J. Geosci. - Geol. en Mijnb.* 91-3, 373-383.

Revil, A., Coperey, A., Shao, Z., Florsch, N., Fabricius, I.L., Deng, Y., Delsman, J.R., Pauw, P.S., Karaoulis, M.C., de Louw, P.G.B., van Baaren, E.S., Dabekaussen, W., Menkovic, A., Gunnink, J.L., 2017. Complex conductivity of soils. *Water Resour. Res.* 53, 7121–7147.

Revil, A., Glover, P.W.J., 1998. Nature of surface electrical conductivity in natural sands, sandstones and clays. *Geophys. Res. Lett.* 25, 691–694.

Revil, A., Karaoulis, M.C., Johnson, T., Kemna, A., 2012. Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. *Hydrogeol. J.* 20, 617–658.

Schaars, F., 2014. Elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht ter bepaling van de verziltingstoestand van het grondwater in het oostelijk gedeelte van de kustvlakte. Artesia rapport 13.34.92, Schoonhoven.

SkyTEM, 2017a. SkyTEM Post Survey Report, TOPSOIL, Belgium 2017. Aarhus, Denmark.

SkyTEM, 2017b. Data report SkyTEM Survey Flanders, Belgium, TOPSOIL project. Aarhus, Denmark.

Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F.S., Gunnink, J.L., Schokker, J., Dambrink, R.M., Hummelman, H.J., Schijf, M.L., 2013. GeoTop modellering (TNO report R10991). Netherlands Inst. of Applied Geoscience TNO, Utrecht.

Te Stroet, C.B.M., Snepvangers, J., 2005. Mapping Curvilinear Structures with Local Anisotropy Kriging. *Math. Geol.* 37(6), 979–988.

- Stuyfzand, P.J., 1986. Een nieuwe hydrochemische klassificatie van watertypen, met Nederlandse voorbeelden van toepassing. *H2O* 23, 562–568.
- Stuyt, L.C.P.M., Blom-Zandstra, M., Kselik, R.A.L., 2016. Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens, Wageningen Environmental Research report 2739. Wageningen.
- Termote J, 2016. Waterlopen in West-Vlaanderen. Jaarboek 2016, Koninklijke West-Vlaamse Gidsenkring vzw.
- Vandenbohede A, 2014. Quartair van de Kustvlakte en polders van de Westerschelde. In: Dassargues A, Walraevens K (ed.), 2014. Watervoerende lagen en grondwater in België / Aquifères et eaux outerraines en Belgique, Gent, Academia Press, 5-15 (ISBN 978-90-382-2364-3).
- Vandenbohede, A., Lebbe, L., 2002. Numerical modelling and hydrochemical characterisation of a fresh-water lens in the Belgian coastal plain. *Hydrogeol. J.* 10, 576–586.
- Vandenbohede, A., Lebbe, L., 2005. Occurrence of salt water above fresh water in dynamic equilibrium in a coastal groundwater flow system near De Panne, Belgium. *Hydrogeol. J.* 14, 462–472.
- Vandenbohede, A., Luyten, K., Lebbe, L.C., 2008. Effects of Global Change on Heterogeneous Coastal Aquifers: A Case Study in Belgium. *J. Coast. Res.* 24, 160-170. doi:10.2112/05-0447.1
- Vandenbohede A, Van Houtte E, Lebbe L, 2009. Sustainable groundwater extraction in coastal areas: a Belgian example. *Environmental Geology* 57, 735-747.
- Vandenbohede A, Courtens C, Lebbe L, De Breuck W, 2010. Fresh-salt water distribution in the central Belgian coastal plain: an update. *Geologica Belgica*, 11/3, 163-172.
- Vandenbohede A, Hinsby K, Courtens C, Lebbe L, 2011. Flow and transport model of a polder area in the Belgian coastal plain: example of data integration. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1599-1615.
- Vandenbohede, A., Walraevens, K., De Breuck, W., 2015. What does the interface on the fresh-saltwater distribution map of the Belgian coastal plain represent? *Geol. Belgica* 18, 31–36.
- Vandevelde, D., Schaars, F., Viezzoli, A. & Gisseloe, P. (2014). Actualization of a 40 year old salinization map of the Eastern Belgian coast using airborne time-domain electromagnetic survey (SkyTEM). Proceedings, 23th Salt Water Intrusion Meeting, Husum, Germany.
- Van Pul P, 2018. Waterbouwkunde in de IJzervlakte (1590-1915). Uitgeverij De Schorre.
- VMM, 2016. Verziltingsstoestand van het Oostelijk kustgebied. Resultaten van het elektromagnetisch onderzoek vanuit de lucht. D/2016/6871/030
- VITO, 2006. Compendium voor monsterneming en analyse in uitvoering van het Materialendecreet en het Bodemdecreet, CMA/2//A.2.

Walraevens, K., Lebbe, L., Van Camp, M., Angius, G., Serra, M.A., Vacca, A., Massida, R., De Breuck, W., 1993. Study and modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers. Proceedings 12th Salt Water Intrusion Meeting, Barcelona, Nov 1992. CIMNE, Barcelona, pp 407-420.

Walraevens, K., Boughriba, M. & De Breuck, W., 1993. Groundwater quality evolution in the Black-Sluice Polder area around Assenede. Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers. Proceedings 12th Saltwater Intrusion Meeting. Barcelona, nov 1992. CIMNE. Barcelona pp 121-142.

Walraevens, K., Martens, K. & De Breuck, W., 1994. Salt/fresh distribution in the polder area near Axel (Zealand-Flanders). 13th Salt Water Intrusion Meeting, 1994, Cagliari. Proceedings. P 321 -334.

Waxman, M., Smits, L., 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. Soc. Pet. Eng. J. 8, 107–122.

Zeuwts, L., 1991. Hydrogeologie en hydrochemie van de IJzervlakte tussen de Frans-Belgische grens en Avekapelle-Perwijze (Wetselijke kustvlakte). Doctoraatsproefschrift. Rijkuniversiteit Gent. 380 p.

A Gebruikte lagen en codering in lithologisch voxelmodel

A.1 Deelgebied Westelijk kustgebied:

Lagenmodel			Voxelmodel
model	Codering		Codering
UGent	1	Duinzand in de duingordel	0011
	2	Overig Holocene zand	0012
	3	Zandige geulafzettingen (onder kreekkruggen)	0013
	4	Holocene silt/klei lagen boven het kustveen	0014
	5	Kustveen of oppervlakteveen	0015
	6	Holocene silt/klei lagen onder het kustveen. In deze laag kan ook veen zitten dat aan de basis van het Holocene voorkomt	0016
	7	Pleistocene afzettingen, vooral uit Eemiaan	0017
	8	Tertiaire Formatie van Tielt	0018
HCOV	0900	Ieperiaan aquitard	0900
	1010	Landeniaan aquifer	1010
	1020	Landeniaan aquitard	1020

A.2 Deelgebied Centraal kustgebied

Lagenmodel			Voxelmodel
model	Codering		Codering
UGent	1	Duinzanden	0021
	2	Holocene geulafzettingen	0022
	3	Holocene klei-veen complex	0023
	4	Pleistocene afzettingen, vooral uit Eemiaan	0024
	5	Formatie van Aalter	0025
	6	Formatie van Gentbrugge	0026
	7	Formatie van Ieper	0027
HCOV	0900	Ieperiaan aquitard	0900

A.3 Deelgebied Meetjesland

Lagenmodel			Voxelmodel
model	Codering		Codering
UGent	1	Bodem en Holocene mariene afzettingen	0031
	2	Continentalen Weichseliaanafzettingen	0032
	3	Mariene Eemiaanafzettingen	0033
	4	Tertiaire zanden van het Lid van Bassevelde van de Formatie van Zelzate	0034
HCOV	0500	Barroon aquitard	0500
	0610	Wemmel-Lede aquifer	0610
	0630	Afzettingen van Boven-Paniseliaan	0630
	0640	Zandige afzettingen van het Onder-Paniseliaan	0640

	0700	Paniseliaan aquitard	0700
	0800	leperiaan aquifer	0800
	0900	leperiaan aquitard	0900

A.4 Deelgebied Linker Scheldeoever

Lagenmodel			Voxelmodel
model	Codering		Codering
UGent	1	Bodem en marien Holocene zandlemige tot kleiige afzettingen	0041
	2	Zandige Lid van Ekeren (estuariene afzettingen)	0042
	3	Veen van Antwerpen	0043
	4	Formatie van Gent (eolische afzettingen) en Formatie van Lembeke (fluviatile afzettingen)	0044
	5	Formatie van Lillo	0045
	6	Formatie van Kattendijk	0046
	7	Formatie van Berchem	0047
HCOV	0300	Boom aquitard	0300
	0430	Ruisbroek-Berg aquifer	0430
	0440	Tongeren aquitard	0440
	0450	Onder-Oligoceen aquifersysteem	0450
	0500	Bartoon aquitard	0500
	0610	Wemmel-Lede aquifer	0610
	0640	Zandige afzettingen van het Onder-Paniseliaan	0640

A.5 Deelgebied Oostelijk kustgebied

Lagenmodel			Voxelmodel
model	Codering		Codering
HCOV	0100	Quartiaire aquifer	0100
	0110	Ophogingen	0110
	0120	Duinen	0120
	0131	Kleiige polderafzettingen van de kustvlakte	0131
	0134	Zandige kreekruigen	0134
	0135	Veen-kleiige poelgronden	0135
	0150	Deklagen	0150
	0161	Pleistoceen van de Kustvlakte	0161
	0500	Bartoon aquitard	0500
	0610	Wemmel-Lede aquifer	0610
	0630	Afzettingen van Boven-Paniseliaan	0630
	0640	Zandige afzettingen van het Onder-Paniseliaan	0640
	0700	Paniseliaan aquitard	0700
	0800	leperiaan aquifer	0800

B Onderzoek relatie EC_b - EC_w op basis in-situ metingen

B.1 Inleiding

De totale elektrische geleidbaarheid van sediment wordt veroorzaakt door de geleidbaarheid van poriewater en de geleidbaarheid die optreedt op het grensvlak van poriewater en de korrels. Deze deeltjesgeleidbaarheid of oppervlaktegeleidbaarheid wordt veroorzaakt door uitwisseling in de elektrische dubbellaag. Deeltjesgeleidbaarheid is daarom het grootst in kleiige afzettingen. Het is belangrijk om bij de vertaling van bulk resistiviteit of geleidbaarheid naar geleidbaarheid van het grondwater ook deze deeltjesgeleidbaarheid mee te nemen.

In FRESHEM Zeeland is voor verschillende lithoklassen zowel de formatiefactor als de deeltjesgeleidbaarheid in het laboratorium bepaald. Voor 71 monsters, verdeeld over verschillende lithoklassen, is de bulk geleidbaarheid gemeten na verzadiging met water met zes verschillende gekende saliniteiten. Meetwaarden werden gefit met een lineair model van parallelle geleidbaarheden (Waxman and Smits, 1968). Voor alle lithoklassen (klei, zandige klei, veen, fijn zand) werden significante deeltjesgeleidbaarheden gemeten, toenemend van fijn zand naar klei.

In FRESHEM Vlaanderen hebben we te maken met andere sedimenten die verschillen in ondermeer afzettingmilieu, ouderdom en compactie. Daarnaast hebben we in Vlaanderen de beschikking over minder hoog-resolutie data over de lithologie dan in Zeeland. Dit memo doet daarom een voorstel voor een methode om de vertaling van bulk geleidbaarheid naar geleidbaarheid van het grondwater specifiek voor FRESHEM Vlaanderen.

B.2 Aanpak FRESHEM Zeeland

In FRESHEM Zeeland zijn formatiefactoren en deeltjesgeleidbaarheden afgeleid voor de verschillende lithoklassen gehanteerd in GeoTOP, het Nederlandse lithologisch model van de ondiepe ondergrond (Staffleu et al., 2013). In de aanpak is ervoor gekozen uit te gaan van laboratoriumanalyses van de geleidbaarheid van monsters, om deze vervolgens te vertalen naar gemiddelde formatiefactoren en deeltjesgeleidbaarheden per GeoTOP lithoklasse.

Op 71 locaties en diepten zijn grondmonsters verzameld, representatief voor de verschillende lithoklassen (Figuur B.1). Het aantal monsters per lithoklasse verschilt. Verdere differentiatie naar stratigrafische eenheid bleek niet mogelijk door het beperkte aantal monsters.

Tabel B.1 Lithoklassen en bepaalde formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid

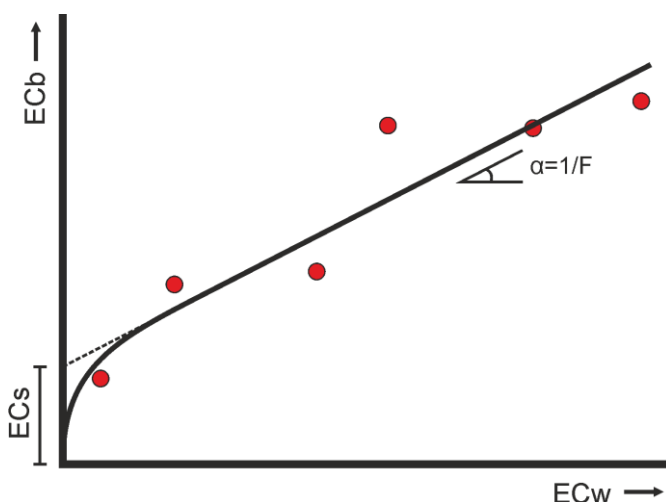
Lithoklasse	Aantal monsters	Formatiefactor (-)	Deeltjesgeleidbaarheid (mS/cm)
Klei	16	4.10 ± 0.15	3.0 ± 0.7
Zandige klei	28	4.53 ± 0.12	2.6 ± 0.5
Fijn zand	22	5.98 ± 0.21	1.6 ± 0.5
Veen	4	2.66 ± 0.33	2.9 ± 3.7
Matig grof zand	1	nvt	nvt



Figuur B.1 Bemonsteringscampagne (links) en verzadiging grondmonsters onder vacuüm (rechts)

Deze monsters zijn verzadigd met oplossingen met verschillende saliniteit (0.31, 5.26, 11.5, 57, 147, en 220 mS/cm (bij 25°C)). Vervolgens is de totale (bulk) geleidbaarheid gemeten.

De relatie tussen poriewater geleidbaarheid EC_w en bulk geleidbaarheid EC_b is vervolgens gefit met het model van parallelle geleidbaarheden (Waxman and Smits, 1968). Zie hiervoor ook sectie B.4. Voor de bepaling van een formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid per lithoklasse is hetzelfde model gefit aan de waarden van alle monsters van de betreffende lithoklasse (Tabel B.1). Dit lineaire model wijkt bij lage waarden van EC_w af van de metingen waardoor de EC_w bij een gegeven EC_b wordt onderschat (vaak zelfs naar negatieve waarden). Dit wordt veroorzaakt doordat bij lage saliniteiten de deeltjesgeleidbaarheid (met name in de Stern-laag (Revil and Glover, 1997)) afhangt van de poriewatergeleidbaarheid. Deze onderschatting is voor het eindresultaat geen probleem omdat de waarden voor EC_w worden geklassificeerd en duidelijke afwijkingen van dit niet-lineaire bereik binnen een enkele klasse vallen.



Figuur B.2 Bepaling formatiefactor F en deeltjesgeleidbaarheid EC_s uit metingen

De hier kort beschreven aanpak is uitgebreid beschreven in (Revil et al., 2017).

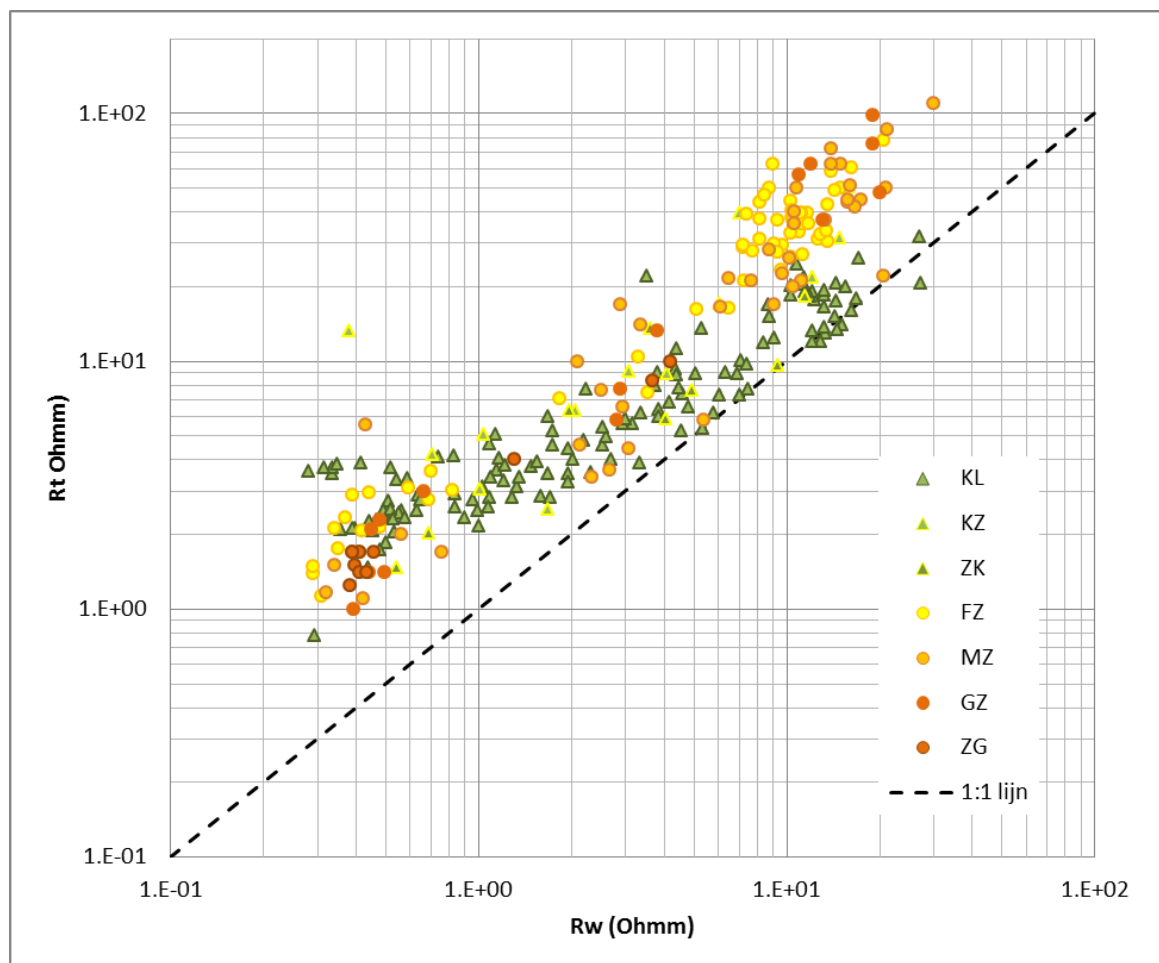
B.3 Beschikbare gegevens Vlaanderen

B.3.1 Lithologie

Door de Universiteit van Gent is een lithologisch model van de ondergrond van de Vlaamse kustregio opgesteld. Hierin komen de volgende lithologische klassen voor: zand, silt/klei, veen, fijn tot middelmatig zand, fijn zand tot kleihoudend zand, leperse klei, klei-veen-zand intercalaties, middelmatig zand, fijn zand, kleihoudend zand tot klei, zandleem/klei, fijn zand met schelpen, zand tot kleihoudend zand, bartoonklei, Boomse klei. Onderscheiden eenheden zijn noodzakelijkerwijs tamelijk grote eenheden waarin lithologische heterogeniteit voorkomt. Ook zijn laaggrenzen niet altijd goed bekend.

B.3.2 Gegevens relatie Rt en Rw

De Universiteit Gent heeft de beschikking over een uitgebreide dataset (280 datapunten) met gecombineerde metingen van de formatieweerstand Rt (reciproke van bulk geleidbaarheid Ecb) en de poriewaterweerstand Rw (reciproke van ECw) voor verschillende lithologieën. De precieze herkomst / locatie van de metingen is niet langer te achterhalen. Het is daarom ook niet bekend wat de precieze lithologie en stratigrafie is van elke meting. De dataset bevat zowel Tertiaire als Quartaire afzettingen.



Figuur B.3 Formatieweerstand (Rt) versus poriewater weerstand (Rw), data Universiteit Gent

De dataset laat een duidelijk verschil zien tussen de zandige en kleiige sedimenten. Waar de zanden op een log-log plot (Figuur B.3) parallel plotten aan de 1: 1 lijn, plotten de kleiige sedimenten onder een hoek met de 1: 1 lijn. Op een log-log plot van weerstandsdata plotten punten die enkel met een formatiefactor te karakteriseren zijn evenwijdig aan de 1: 1 lijn, met een verschuiving die is gerelateerd aan de grootte van de formatiefactor. Hier voldoen de zanden goed aan, geheel in overeenstemming met de theorie. Immers, in schone zanden is de bijdrage van de deeltjesgeleidbaarheid te verwaarlozen.

B.4 Waxman-Smits versus Patnode-Wyllie

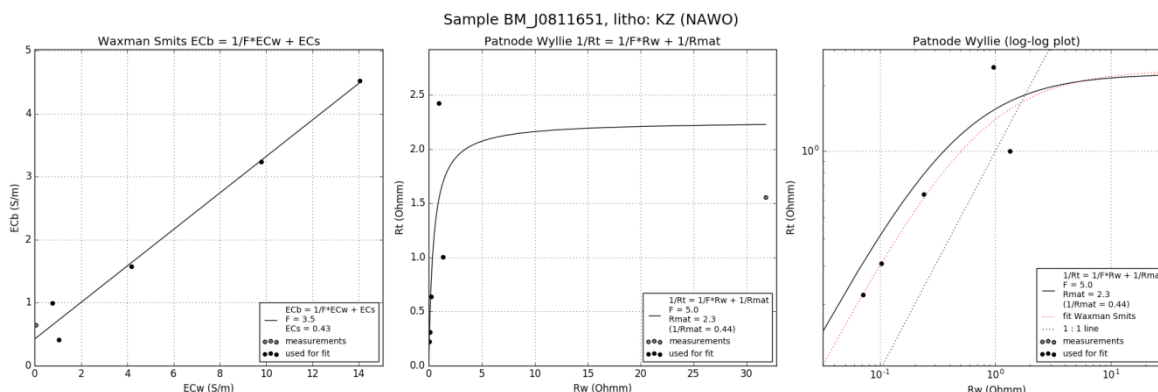
Een eenvoudige manier om de invloed van deeltjesgeleidbaarheid op de totale (bulk) geleidbaarheid van de bodem te schematiseren is om deze te beschouwen als een parallelle schakeling. In termen van weerstanden volgt dan (Patnode and Wyllie, 1950):

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{F \cdot R_{wt}} + \frac{1}{R_{mat}} \tag{B.1}$$

Waxman en Smits (1968) geven een identiek model, maar dan geschreven in geleidbaarheden:

$$EC_b = \frac{1}{F} EC_w + EC_s \tag{B.2}$$

Waar beide formuleringen feitelijk identiek zijn, geeft het fitten van de data aan de twee vergelijkingen duidelijke verschillen. Dit komt doordat de vergelijkingen worden gefit door de gekwadraterde verschillen te minimaliseren. Bij het fitten van geleidbaarheden tellen de grotere geleidbaarheden (want grotere afwijkingen) zwaarder mee in de fit, bij weerstanden juist de hogere weerstanden. Figuur B.4 geeft hier een voorbeeld van, waarbij de formatiefactor op basis van geleidbaarheden op 3.5 wordt geschat, en op basis van weerstanden op 5.0. Het lineaire deel van de log-log plot representeert het deel waarin de formatiefactor dominant is. Waarden op dit lineaire deel worden beter benaderd met een fit op basis van geleidbaarheden. In het algemeen wordt de formatiefactor op basis van geleidbaarheden lager ingeschat (gemiddeld zo'n 25% lager) dan op basis van weerstanden. De deeltjesgeleidbaarheid wordt op basis van geleidbaarheden zo'n 10% lager berekend dan op basis van weerstanden.



Figuur B.4 Fit van FRESHM Zeeland monster BM_J811651 met geleidbaarheden (links) en weerstanden (midden). Rechts is een log-log weergave van de middelste figuur. Voor het bepalen van de fit is de oplossing met kleinste geleidbaarheid niet meegenomen.

Het algemene beeld op basis van de resultaten (zie bijvoorbeeld Figuur B.4) is dat fitten op basis van geleidbaarheid een betere fit oplevert in het lineaire traject van de EC_w-EC_b / R_w-R_t relatie. Dit is te verklaren doordat dit traject uitgedrukt in geleidbaarheid de hogere waarden betreft en uitgedrukt in resistiviteiten juist de lagere waarden. Afwijkingen tellen bij hogere waarden in het fitproces zwaarder mee waardoor de fit op deze waarden beter uitvalt wanneer wordt gefit op geleidbaarheden. Dit is goed te zien in Figuur B.4, uiterst rechts, waar de rode lijn (W-S) in het lineaire traject door de metingen gaat en de zwarte (P-W) een afwijking laat zien. Gemiddeld over alle monsters wordt op basis van geleidbaarheden de ECs (of 1/R_{mat}) zo'n 10% lager ingeschat terwijl de formatiefactor zo'n 25% lager wordt ingeschat dan op basis van resistiviteiten.

Een goede fit in het lineaire bereik is belangrijk omdat in dit traject het eenvoudige model van parallelle schakelingen het beste overeenkomt met de werkelijkheid. Gegeven het feit dat fits op basis van geleidbaarheid leiden tot een betere fit in het lineaire bereik, lijkt deze methode dan ook te verkiezen boven fitten op basis van resistiviteiten. De wat slechtere fit in het niet-lineaire bereik is minder erg omdat dit bereik in het eindresultaat grotendeels in één geleidbaarheidsklasse valt.

Het toepassen van dit eenvoudige, lineaire model van parallelle geleidbaarheden betekent dat we de afname van de deeltjesgeleidbaarheid met de poriewatergeleidbaarheid bij lage poriewatergeleidbaarheden (zeg beneden de 2 mS/cm) verwaarlozen. Concreet heeft dit tot gevolg dat lage waarden van de bulk geleidbaarheid kunnen leiden tot negatieve waarden voor de poriewater geleidbaarheid. Deze negatieve waarden worden in de procedure gecorrigeerd naar nul, en vallen in de laagste geleidbaarheidsklasse in het eindresultaat.

B.5 Bepaling formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid Vlaanderen

Gebruik makend van de R_t/R_w dataset van de Universiteit Gent is de formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid volgens vijf varianten bepaald:

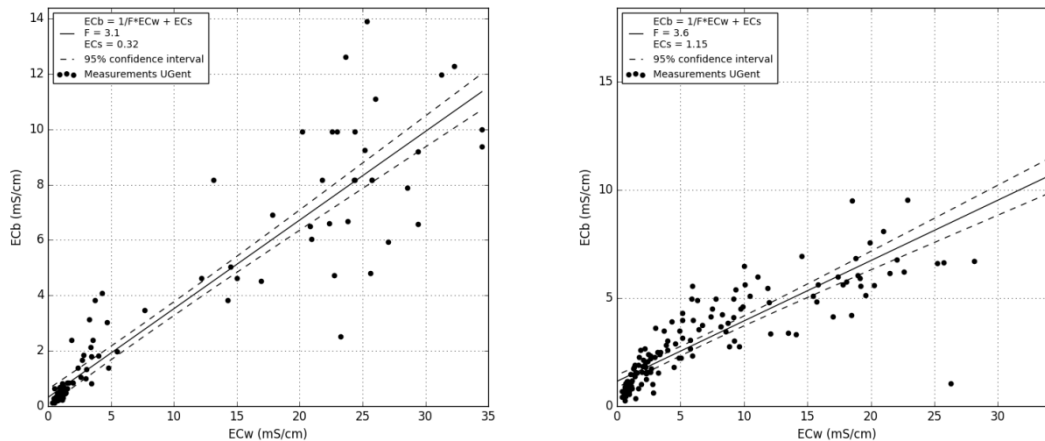
- 1 Directe fit op alle R_t/R_w data,
- 2 Fit waarbij de ECs / R_{mat} op basis van FRESHEM Zeeland is 'vastgezet',
- 3 Fit waarbij alleen de datapunten met een EC_w hoger dan 2 mS/cm zijn meegenomen,
- 4 Fit waarbij alleen de datapunten met een EC_w hoger dan 2 mS/cm zijn meegenomen, en additioneel meetgegevens uit De Louw et al. (2011),
- 5 Fit waarbij de ECs / R_{mat} op basis van FRESHEM Zeeland is 'vastgezet', en additioneel meetgegevens uit De Louw et al. (2011) zijn meegenomen.

Deze vijf manieren zijn op basis van geleidbaarheden (Waxman-Smits, W-S). Hierbij zijn de zanden (lithologie-categorieën FZ, MZ, GZ en ZG), en de kleiïge sedimenten (KL, KZ en ZK) samengenomen. Dit omdat (1) in het beschikbare lithologische model nadere detaillering in lithologie niet beschikbaar is en (2) de samengenomen categorieën visueel niet zijn te onderscheiden in Figuur B.3 (duidelijk andere helling bijvoorbeeld). Gekende kleiïge tertiaire monsters zijn uit de dataset verwijderd omdat deze sterk gecompacteerd zijn en duidelijk afwijkend van Quartaire kleiïge monsters. Tenslotte is ook – op basis van gegevens van FRESHEM Zeeland – een waarde afgeleid voor de formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid van het kustveen.

B.5.1 Variant 1: alle data Universiteit Gent

In deze variant zijn zowel de formatiefactor als de deeltjesgeleidbaarheid direct gefit aan alle bij de Universiteit Gent beschikbare data (Figuur B.3). Hierbij worden alle lokale gegevens

gebruikt waarvan een belangrijk deel zich bevindt in het gedeelte waarbij het model van parallelle geleidbaarheden niet opgaat: het zoete bereik.

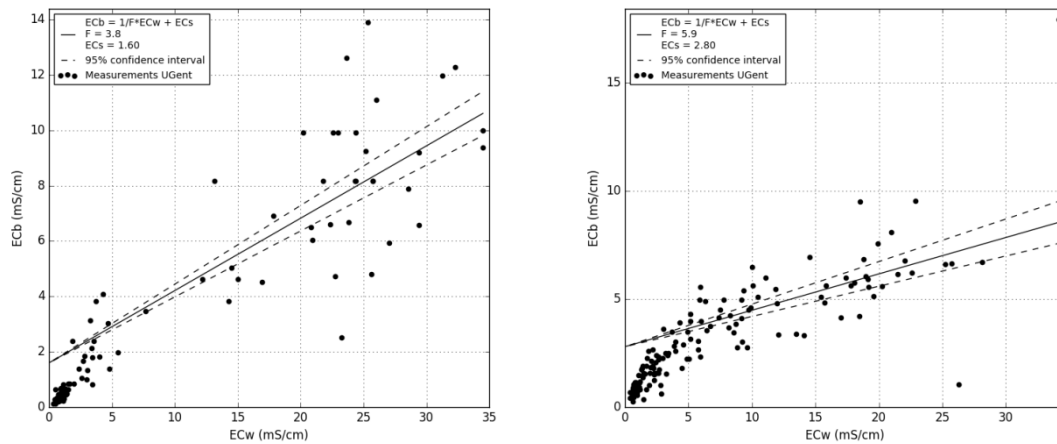


Figuur B.5 Fit van R_w - R_t gegevens van lithologie-klassen FZ, MZ, GZ en ZG (links) en KL, KZ en ZK (rechts, waarbij alle UGent metingen zijn meegenomen).

Zowel de op deze manier afgeleide deeltjesgeleidbaarheid als de formatiefactor is flink lager dan in FRESHEM Zeeland. Dit kan ermee te maken hebben dat de dataset relatief veel datapunten bevat met een lage poriewatergeleidbaarheid waarvoor het model van parallelle schakelingen niet geldt. Daarnaast gaat het om vergelijkbare, maar andere sedimenten. Tenslotte is er sprake van meer variatie in de dataset van de Universiteit Gent (280 unieke metingen) dan in de FRESHEM Zeeland dataset (72 unieke monsters, elk meerdere EC_w - EC_b metingen).

B.5.2 Data Universiteit Gent, deeltjesgeleidbaarheid o.b.v. FRESHEM Zeeland

Bij lage waarden van de poriewater geleidbaarheid EC_w is de deeltjesgeleidbaarheid EC_s niet constant maar wordt beïnvloed door de poriewater geleidbaarheid (Revil and Glover, 1997). Het model van parallelle schakelingen gaat echter uit van een constante deeltjesgeleidbaarheid. In het project FRESHEM Zeeland is de deeltjesgeleidbaarheid voor verschillende lithologieën nauwkeurig bepaald in het laboratorium. De bepaling van de deeltjesgeleidbaarheid in het laboratorium door elke sample met oplossingen met verschillende geleidbaarheden te verzadigen, is zeer betrouwbaar (Revil et al., 2017). Wel verschilt de deeltjesgeleidbaarheid sterk tussen verschillende samples binnen dezelfde lithologische klasse. In deze analyse zijn de beschikbare metingen van de Universiteit Gent gefit aan het model van parallelle schakelingen waarbij de deeltjesgeleidbaarheid is vastgezet op de meest relevante waarde uit FRESHEM (zandige sedimenten: FZ, kleiïge sedimenten: gemiddelde van K en KZ).

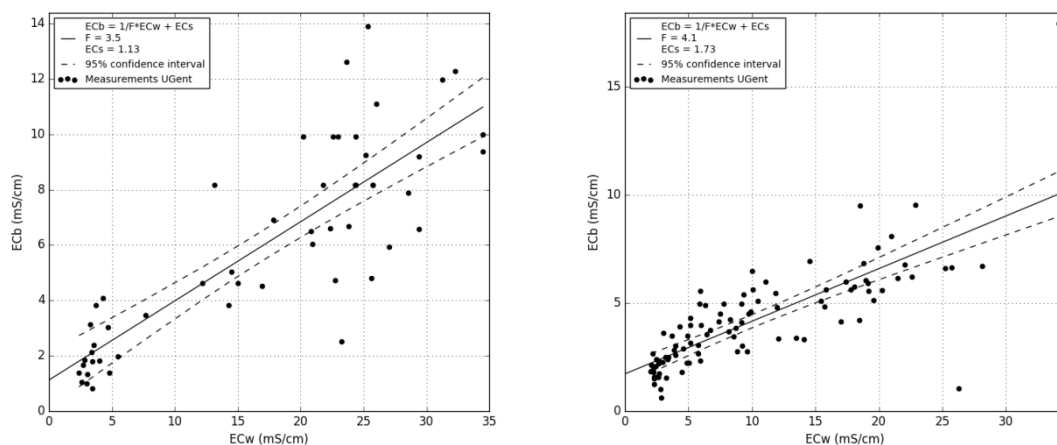


Figuur B.6 Fit van Rw-Rt gegevens van lithologie-klassen FZ, MZ, GZ en ZG (links) en KL, KZ en ZK (rechts), waarbij alle UGent metingen zijn meegenomen, maar waarbij de deeltjesgeleidbaarheid is vastgezet op de FRESHEM Zeeland waarde.

Formatiefactoren die op deze manier worden afgeleid zijn beduidend hoger dan wanneer de deeltjesgeleidbaarheid op basis van de data zelf wordt gefit. De formatiefactor voor zandige sedimenten neemt toe van 3.1 naar 3.8, voor kleiïge sedimenten zelfs van 4.8 tot 5.9. Deze toename in formatiefactor komt doordat de fit niet langer beïnvloed wordt door de datapunten met lage geleidbaarheden.

B.5.3 Data Universiteit Gent, uitgezonderd EC water < 2 mS/cm

Bij lage waarden van de poriewater geleidbaarheid EC_w is de deeltjesgeleidbaarheid EC_s niet constant maar wordt beïnvloed door EC_w (Revil and Glover, 1997). Het model van parallelle schakelingen gaat echter uit van een constante deeltjesgeleidbaarheid. Daarom zijn in deze analyse de beschikbare metingen van de Universiteit Gent gefit aan het model van parallelle schakelingen, uitgezonderd metingen met een poriewater geleidbaarheid kleiner dan 2 mS/cm. In tegenstelling tot de vorige analyse wordt hier alleen gebruik gemaakt van lokale gegevens. De afleiding van de deeltjesgeleidbaarheid is, door de grotere spreiding in de data (doordat zowel verschillen in lithologie als in poriewatergeleidbaarheden worden gemengd), wel onzekerder.

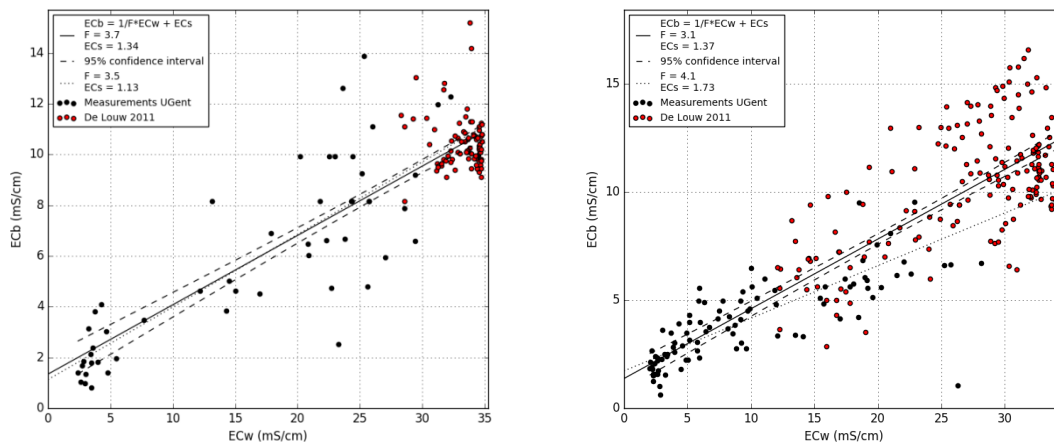


Figuur B.7 Fit van Rw-Rt gegevens van lithologie-klassen FZ, MZ, GZ en ZG (links) en KL, KZ en ZK (rechts), waarbij EC_w waarden kleiner dan 2 mS/cm niet zijn meegenomen in de fit.

Met deze analyse afgeleide formatiefactoren en deeltjesgeleidbaarheden voor zowel de zandige als de kleiige sedimenten liggen ongeveer midden tussen de twee eerdere analyses.

B.5.4 Data Universiteit Gent, uitgezonderd EC water < 2 mS/cm, aangevuld met metingen Perry de Louw

In het kader van zijn promotieonderzoek heeft Perry de Louw in het Zeeuwse kustgebied van een groot aantal monsters EC bulk en EC water bepaald. Deze monsters zijn genomen in mariene Holocene sedimenten, vergelijkbaar met de Holocene sedimenten in Vlaanderen.

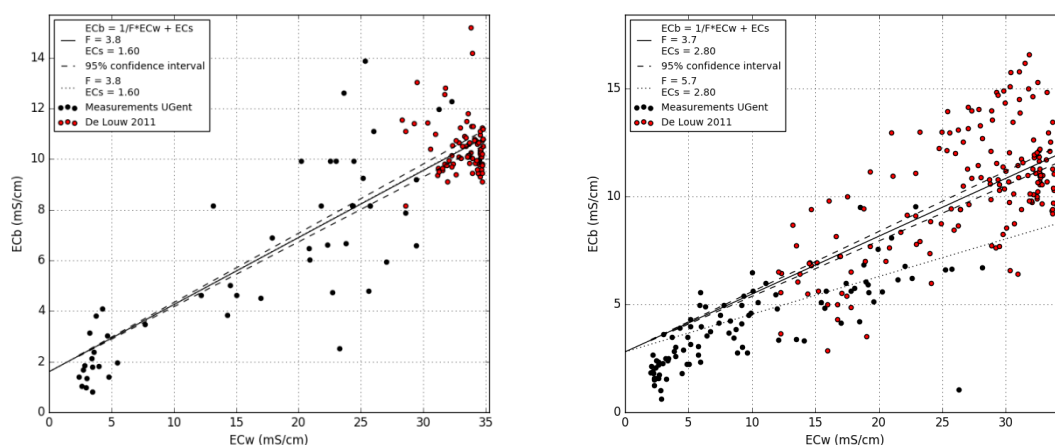


Figuur B.8 Fit van Rw-Rt gegevens van lithologie-klassen FZ, MZ, GZ en ZG (links) en KL, KZ en ZK (rechts), inclusief gegevens van De Louw et al. (2011), waarbij ECw waarden kleiner dan 2 mS/cm niet zijn meegenomen in de fit. De gestippelde lijn geeft de eerder afgeleide fit exclusief De Louw (2011).

Voor de zanden zijn de gegevens sterk vergelijkbaar, en de toevoeging van de gegevens heeft dan ook weinig weerslag op de gefitte formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid. Dit is anders voor de kleien. De data van De Louw (2011) passen binnen de spreiding van de dataset van de Universiteit Gent, maar een groot aantal van de metingen liggen wat meer 'rechtsboven' in de grafiek. De toevoeging van de data van De Louw et al. (2011) zorgt daarmee voor een verlaging van zowel de formatiefactor als van de deeltjesgeleidbaarheid. Wel is de onzekerheid kleiner, omdat de fit is gestoeld op meer metingen.

B.5.5 Deeltjesgeleidbaarheid op basis FRESHEM Zeeland, gegevens aangevuld met data De Louw (2011)

Tenslotte combineren we de data van de Universiteit Gent en van De Louw (2011), met de deeltjesgeleidbaarheid bepaald in FRESHEM Zeeland. Door de bepaling in het laboratorium is deze deeltjesgeleidbaarheid met meer zekerheid bepaald (alleen significante onzekerheid door lithologische variatie).



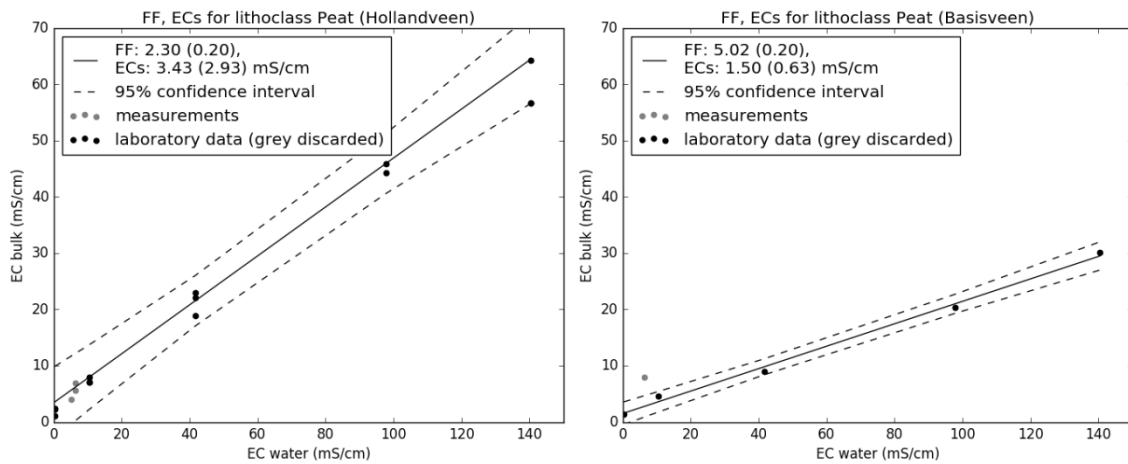
Figuur B.9 Fit van Rw-Rt gegevens van lithologie-classes FZ, MZ, GZ en ZG (links) en KL, KZ en ZK (rechts), inclusief gegevens van De Louw et al. (2011), waarbij ECs is vastgezet op de waarde van FRESHEM Zeeland. De gestippelde lijn geeft de afgeleide fit exclusief De Louw (2011).

Voor de zandige sedimenten is de deeltjesgeleidbaarheid enigszins hoger dan afgeleid op basis van de hier gebruikte gegevens (1.60 in plaats van 1.34 mS/cm), de formatiefactor neemt daarom ook beperkt toe (3.8 om 3.7). De in het laboratorium bepaalde deeltjesgeleidbaarheid van de kleiige sedimenten in Zeeland is ongeveer tweemaal de op basis van deze data afgeleide deeltjesgeleidbaarheid (2.80 in plaats van 1.37 mS/cm). De formatiefactor is daarom hoger, 3.7 in plaats van 3.1.

B.5.6 Formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid Kustveen

In de Universiteit Gent dataset zijn geen enkele meetpunten beschikbaar. Veen wordt wel onderscheiden binnen het lithologisch model, als 'Kustveen'. In de FRESHEM Zeeland dataset zijn vier veen-monsters beschikbaar. Bij drie monsters gaat het om het 'Hollandveen', in één geval om 'Basisveen'. Het Basisveen is in het begin van het Holoceen afgezet, en is sterk gecompacteerd door bovenliggende sedimenten. Het Hollandveen is veel later in het Holoceen afgezet en veel minder gecompacteerd. Het Nederlandse Hollandveen correspondeert met het in het lithologisch model onderscheiden 'Kustveen'.

In FRESHEM Zeeland is geen onderscheid gemaakt in formatiefactoren en deeltjesgeleidbaarheid binnen lithoklassen. Zo is ook Hollandveen en Basisveen niet onderscheiden, ondanks dat er een duidelijk verschil zichtbaar was tussen de drie Hollandveen monsters en het Basisveen monster. Dat is ook niet onverwacht, omdat het Basisveen een sterk gecompacteerd veenlaag betreft en daarmee sterk verschilt van het Hollandveen. Aangezien we binnen het lithologisch model van Vlaanderen alleen te maken hebben met het Kustveen (<-> Hollandveen), is daarom op basis van alleen de drie FRESHEM Zeeland Hollandveen monsters een formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid afgeleid.



Figuur B.10 FF en ECs voor onderscheiden Hollandveen (links) en Basisveen (rechts) monsters (data FRESHEM Zeeland).

De voor Hollandveen afgeleide formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid zijn, respectievelijk: 2.3 ± 0.2 , en 3.43 ± 2.93 mS/cm.

B.5.7 Samenvatting varianten formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid

De verschillende varianten voor formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid zijn samengevat in Tabel B.2.

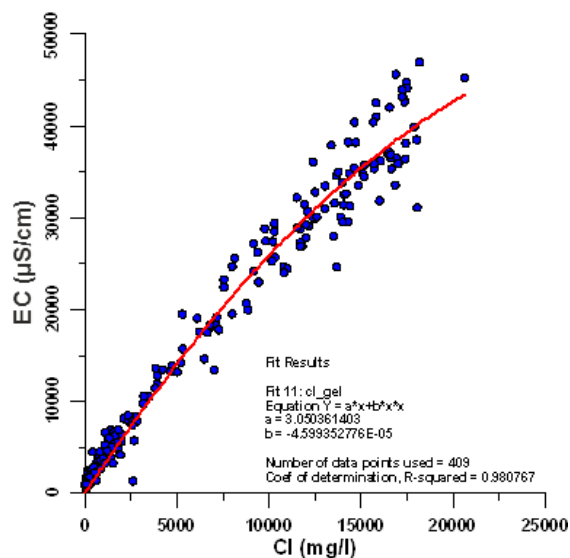
Tabel B.2 Formatiefactor (FF) en deeltjesgeleidbaarheid (ECs)

Lithologie	Zandige afzettingen		Kleiige afzettingen		Kustveen	
	FF (-)	ECs (mS/cm)	FF (-)	ECs (mS/cm)	FF (-)	ECs (mS/cm)
1. alle samples	3.12±0.11	0.32±0.15	3.58±0.19	1.15±0.15		
2. fixed ECs (Zeeland)	3.83±0.17	1.60±0.45	5.94±0.51	2.80±0.58		
3. samples > 2mS/cm	3.50±0.32	1.13±0.51	4.11±0.35	1.73±0.26		
4. samples > 2mS/cm + De Louw 2011	3.66±0.16	1.34±0.35	3.34±0.13	1.30±0.26		
5. fixed ECs (Zeeland) + De Louw 2011	3.78±0.06	1.60±0.45	4.17±0.12	2.80±0.58		
Gebaseerd op FRESHEM Zeeland					2.30±0.20	3.43±2.93

^a De onzekerheid (se) is overgenomen van FRESHEM Zeeland

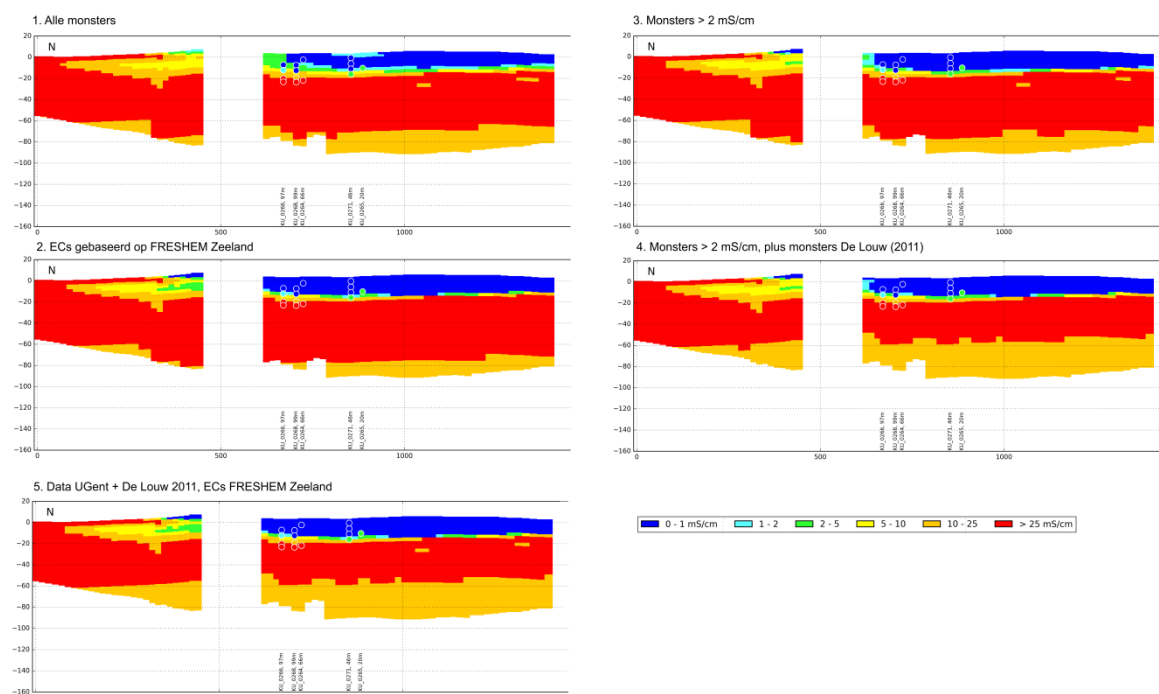
B.6 Vergelijking varianten met gemeten poriewater EC

Met behulp van de verschillende afgeleide waarden voor formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid (Tabel B.2) zijn 2D profielen van resistiviteit vertaald naar poriewater EC, geclassificeerd in de klassen 0 – 1, 1 – 2, 2 – 5, 5 – 10, 10 – 25, > 25 mS/cm. Deze zijn vergeleken met de beschikbare chloride-analyses (vertaald naar EC25 volgens Figuur B.11, en op dezelfde wijze geclassificeerd). Gerapporteerde afwijkingen zijn dan ook afwijkingen in het aantal klassen. De vergelijking heeft plaatsgevonden voor alle beschikbare analyses, die zich binnen 50 m van een vlieglijn bevinden, in totaal 190 punten (combinaties van grondwaterputten en buizen).



Figuur B.11 Vertaling Cl naar EC (data en fit UGent)

Figuur B.12 geeft een voorbeeld van deze vergelijking, voor vlieglijn 300301 (centrale kust). De verschillende varianten van formatiefactor en deeltjesgeleidbaarheid resulteren - uitgaande van hetzelfde resistiviteitsprofiel – in verschillende profielen van poriewater EC, en komen meer of minder overeen met de gemeten EC in het grondwater.

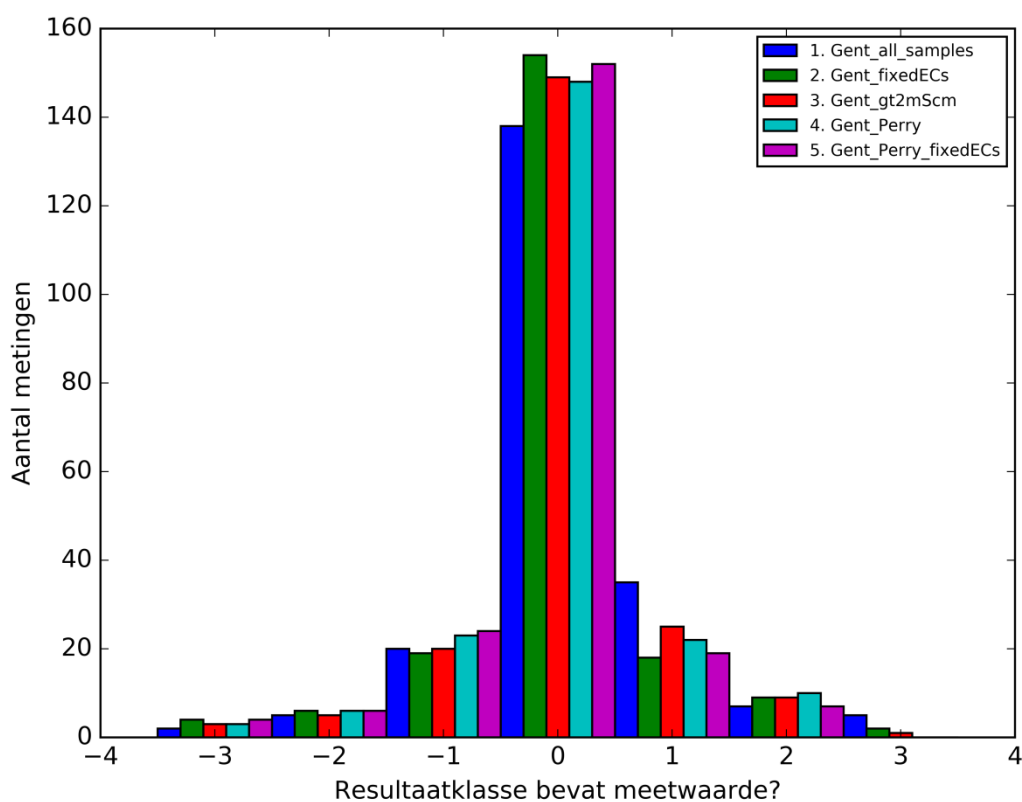


Figuur B.12 Voorbeeld vergelijking poriewatergeleidbaarheid met gemeten grondwater EC voor een deel van vlieglijn L300301 (centrale kust)

Uit Figuur B.12 komt naar voren dat variant 1 zorgt voor de breedste brakke zone, en varianten 2 en 5 voor de smalste brakke zone. Varianten 3 en 4 zitten hier tussenin. Afgaande op Figuur

B.12 lijken varianten 2 en 5 het beste te passen bij de metingen, 1 het slechtste. Verschillen tussen varianten 2, 3, 4 en 5 zijn echter klein.

Eenzelfde beeld komt naar voren uit de totale vergelijking. Figuur B.13 geeft een histogram van de afwijking tussen de vijf varianten en de geclassificeerde meetwaarden. Variant 1 is beduidend slechter dan de andere vier varianten. Variant 2 laat de kleinste gemiddelde afwijking zien, variant 5 heeft de kleinste RMSE waarde. De verschillen tussen varianten 2, 3, 4 en 5 zijn erg klein.



Figuur B.13 Histogram van afwijkingen van geclassificeerde poriewater EC ten opzichte van gemeten EC voor de vijf varianten.

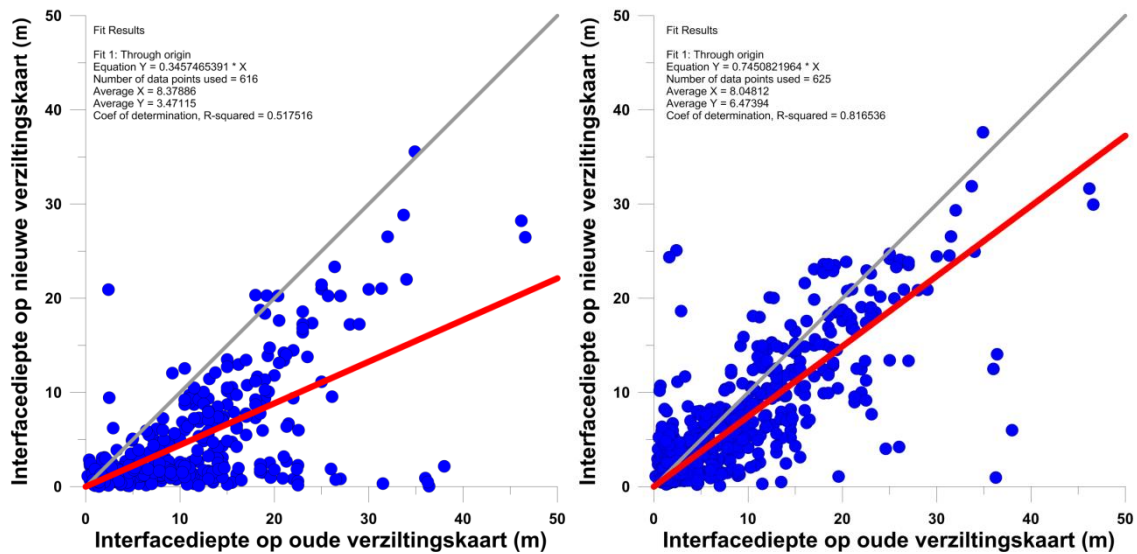
Omdat het eindresultaat van dit project alleen geclassificeerd beschikbaar wordt gesteld is de vergelijking tussen berekende en gemeten klassen het belangrijkste. Daarnaast is ook gekeken naar de absolute waarden. Daarbij valt op dat met name de varianten 2 en 3 door hun hogere formatiefactor voor klei in enkele gevallen onrealistisch hoge EC's van het grondwater kunnen berekenen. De classificering zorgt er overigens voor dat dit in het eindresultaat niet voorkomt.

Varianten 4 en 5 hebben voor klei een lagere formatiefactor, hierbij komen geen onrealistisch hoge berekende EC's voor.

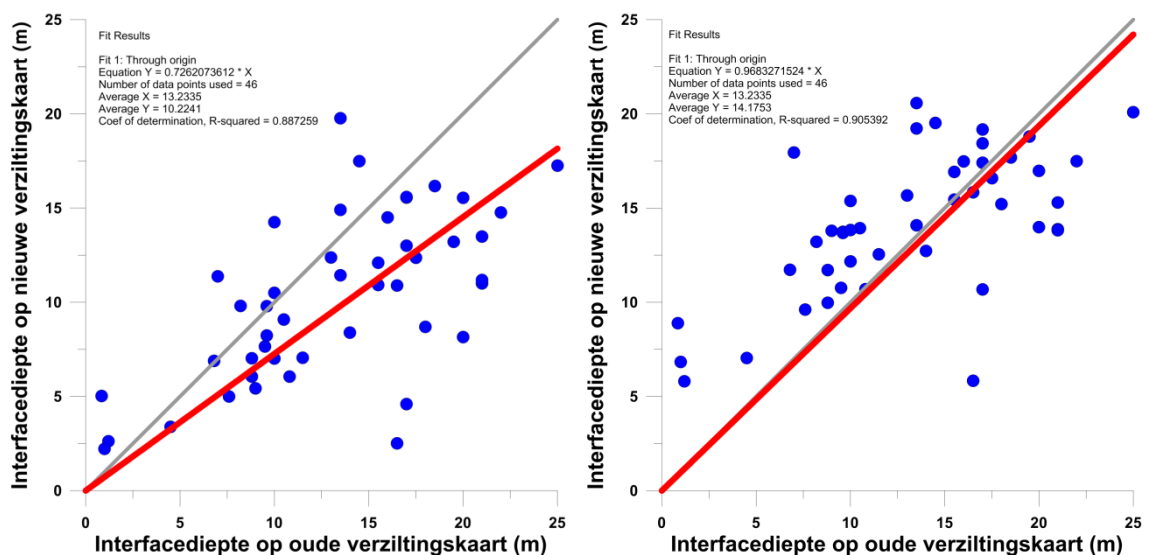
Door de combinatie van een hoge formatiefactor en een hoge deeltjesgeleidbaarheid levert variant 2 de scherpste zoet-zout overgangen op. De brakke zone wordt hierbij geminimaliseerd. In AEM metingen is over het algemeen juist sprake van een overschatting van de brakke zone, door de lagere resolutie in de verticaal (ten opzichte van bijvoorbeeld een ECPT meting) en een grotere horizontale footprint. Het lijkt er op dat dit effect (bredere brakke zone) voor een deel door variant 2 wordt gecompenseerd. Dit ten koste van onrealistische waarden in het hoge bereik, die niet tot uitdrukking komen in het eindresultaat.

C Grafieken en kaarten vergelijking verziltingsvlak

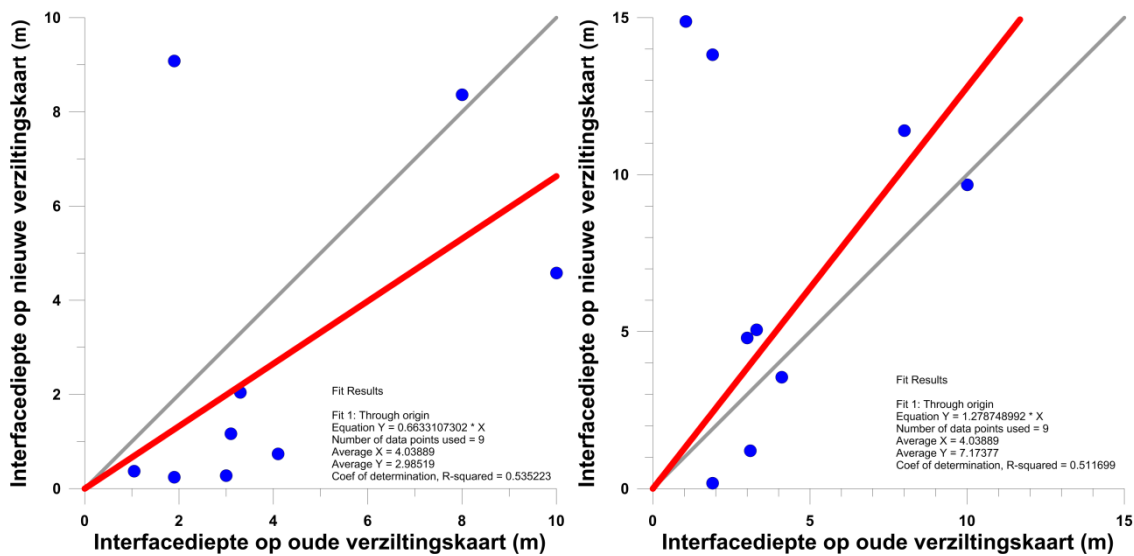
Deze grafieken horen bij de vergelijking van het verziltingsvlak met de VES-metingen waarop de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989) is gebaseerd, paragraaf 11.7.



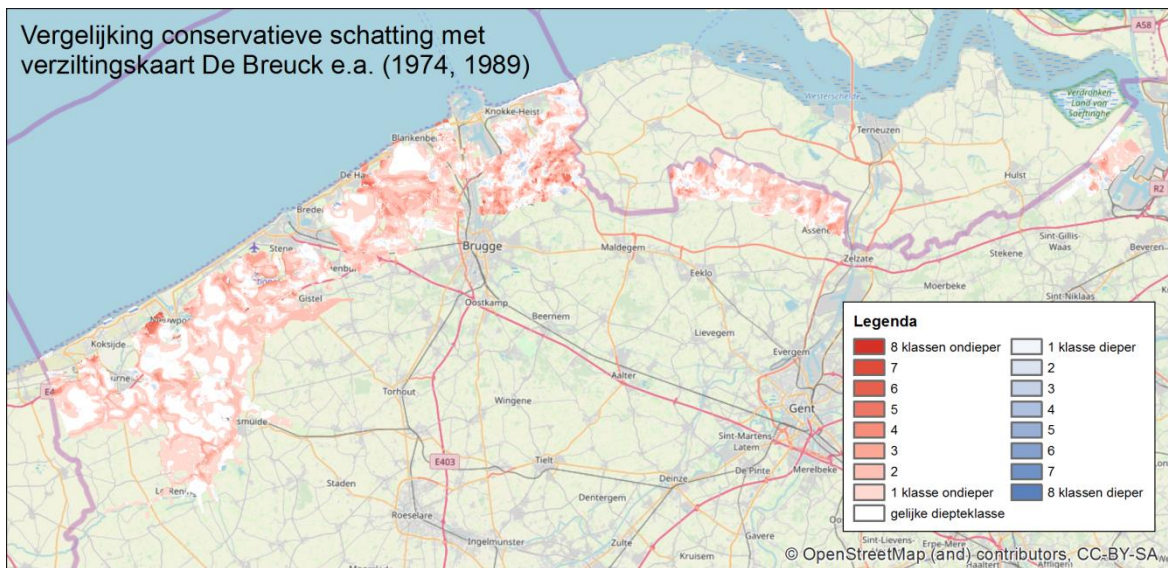
Figuur C.1 Vergelijking van het zoet / brakwatergrensvlak op de locaties van VES metingen in het kustgebied, voor de conservatieve schatting (links) en de optimistische schatting (rechts)



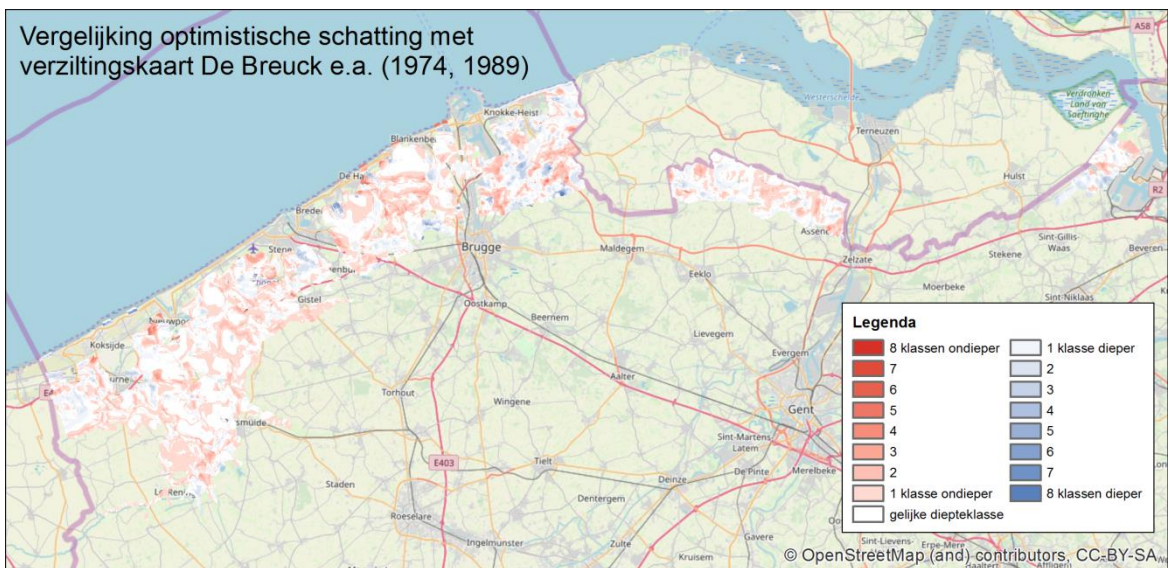
Figuur C.2 Vergelijking van het zoet / brakwatergrensvlak op de locaties van VES metingen in het Meetjesland, voor de conservatieve schatting (links) en de optimistische schatting (rechts)



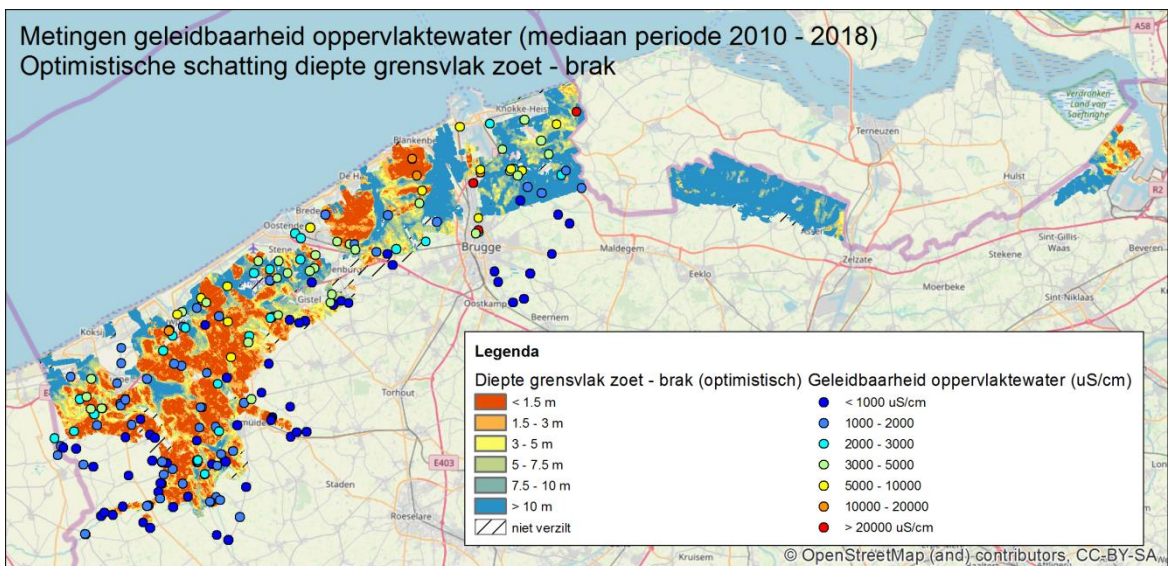
Figuur C.3 Vergelijking van het zoet / brakwatergrensvlak op de locaties van VES metingen in Linker Scheldeoever, voor de conservatieve schatting (links) en de optimistische schatting (rechts)



Figuur C.4 Vergelijking afwijking in klassen tussen de conservatieve schatting en de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989). Hierbij is de klassenindeling gehanteerd volgens de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989), bij een klasse ondieper ligt het zoet-brak grensvlak in de conservatieve schatting ondieper dan de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989). Niet-verzilte gebieden zijn in de vergelijking niet meegenomen.



Figuur C.5 Vergelijking afwijking in klassen tussen de optimistische schatting en de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989). Hierbij is de klassenindeling gehanteerd volgens de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989), bij een klasse ondieper ligt het zoet-brak grensvlak in de optimistische schatting ondieper dan de verziltingskaart van De Breuck (1974, 1989). Niet-verzilt gebieden zijn in de vergelijking niet meegenomen.



Figuur C.6 Geleidbaarheidsmetingen in het oppervlaktewater (mediane waarden over de periode 2010 – 2018, in $\mu\text{S/cm}$), weergegeven op de optimistische inschatting van het zoet – brak grondwater grensvlak.

D Uitgevoerde extra grondmetingen



In samenwerking met het TTW onderzoeksprogramma WaterNEXUS (gesubsidieerd door NWO en Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, project 14298) zijn in het studiegebied extra veldmetingen uitgevoerd. Het gaat om SlimFlex metingen, Surface ERT en Spectral Induced Polarization metingen. Deze worden in deze appendix verder toegelicht.

D.1 SlimFlex measurements

D.1.1 Introduction

On the 22nd and 23rd of November 2017, electromagnetic (EM) induction borehole logging measurements were made at 8 locations in the area of Flanders, Belgium (Figure D.1). The EM induction logs were acquired by equipment and staff members of Deltares. Field guidance and access to the piezometers were arranged by the Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). The results of the EM induction logs will be used for comparison (ground truth) with airborne EM data, collected in the same area.



Figure D.1: Overview of the 8 measurement locations. Bottom right: inset map with Belgium indicated in grey.

D.1.2 Methodology

The EM-induction borehole logs were acquired using the EM-Slimflex, manufactured by Antares (GER) and Deltares (NED). The principle of the tool to measure the electrical conductivity of the subsurface (*EC_{bulk}*) is essentially similar to common EM induction borehole logging tools; an alternating current is produced in a 'transmitting coil', which leads to a primary EM field (Figure D.2). In the subsurface, this primary EM induces eddy currents, resulting in a secondary EM field. In a receiver coil, both EM fields are recorded. The *EC_{bulk}* is proportional to the difference (phase and amplitude) between the two fields.

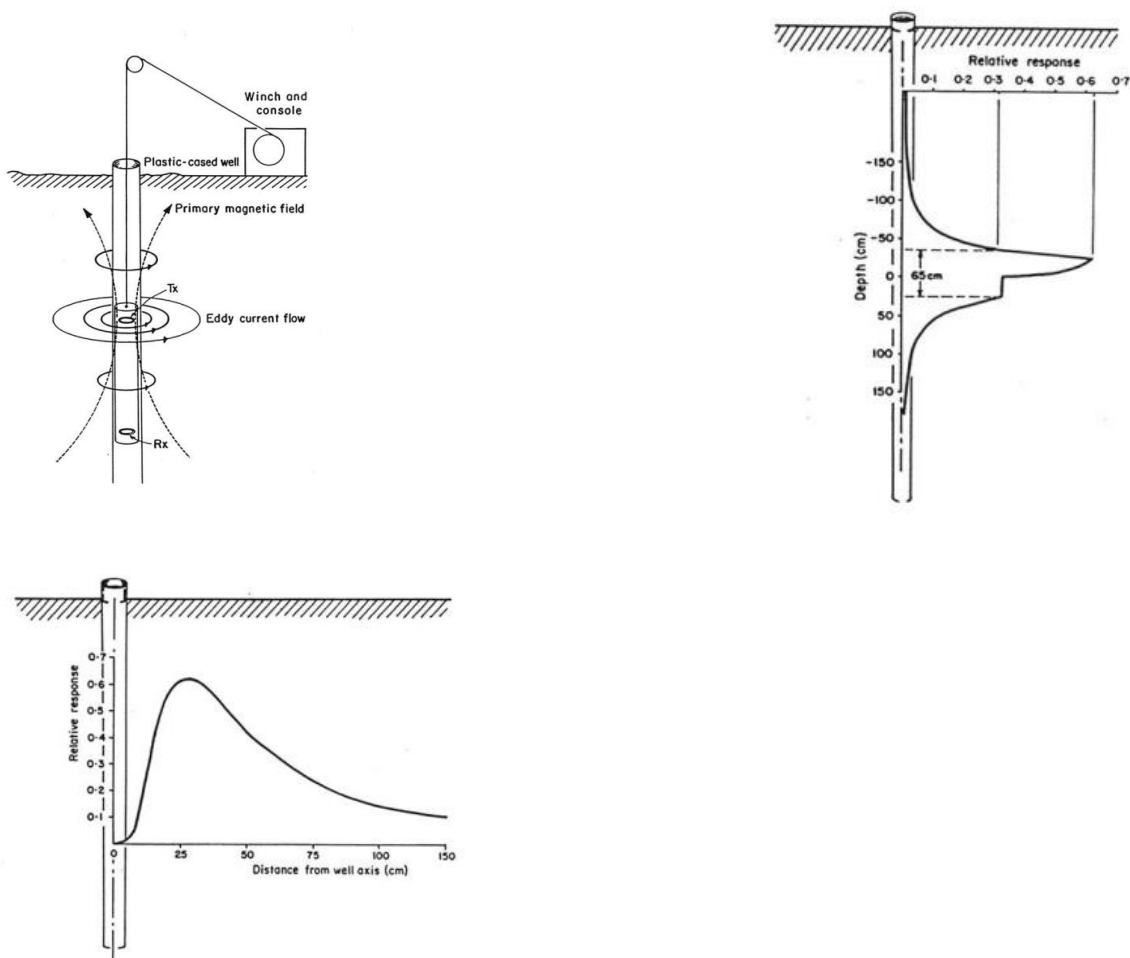


Figure D.2: Principle of EM induction logging (taken from Geonics 'Technical Note 20 TN-20', available online via www.geonics.com). Upper left: operational set-up, Tx and Rx indicate the transmitter and receiver coils, respectively. Upper right: relative tool response in the vertical direction. Lower: relative tool response in the horizontal direction. Both tool responses are for the Geonics EM 39; for the EM-Slimflex the tool response is similar.

The EM-Slimflex is designed such that the measurement of *EC_{bulk}* is not influenced by the vicinity of the tool itself, such as the salinity of the water in the piezometer and the backfill of the borehole (Figure D.2). Note that the material of the piezometer should be non-conductive, such as PVC. *EC_{bulk}* cannot be measured if the piezometer is made out of steel. In addition, the *EC_{bulk}* measurements are often influenced by the steel protection casing that is often

present in the upper 1-2 meters to protect the piezometer. In many cases, the steel objects result in negative values of EC_{bulk} .

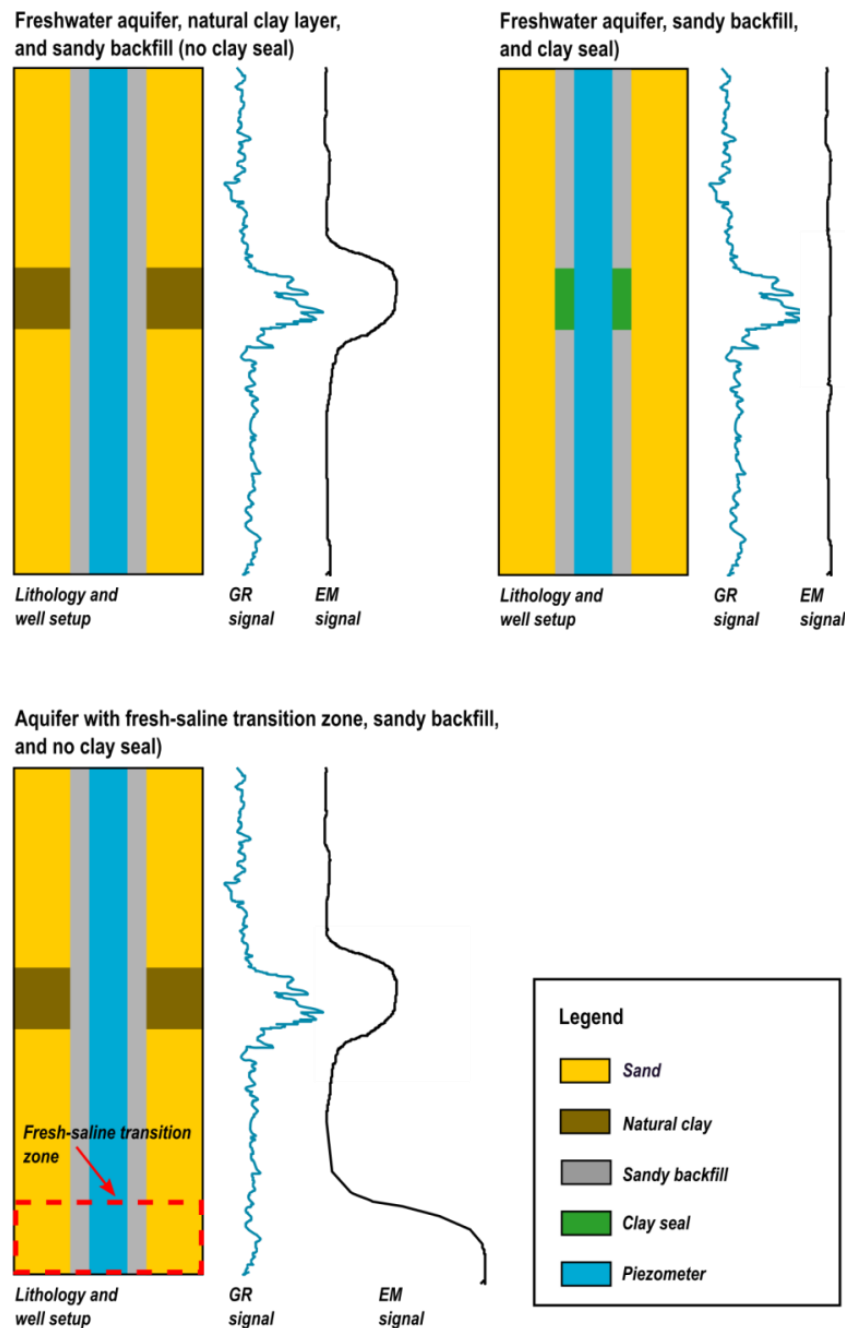


Figure D.3: Concept of GR and EM signals (EC_{bulk}) in different situations.

In addition to EC_{bulk} the natural gamma radiation (GR) is measured in tool. The GR measurement is an indication of the lithology; the GR value is usually higher in clay than in sand. However, sealing clay such as bentonite also influences the GR values (Figure D.3). It is therefore important that the backfill of the borehole is known for an appropriate interpretation of the GR values.

The *ECbulk* is determined by the electrical properties of both the pore water fluid and the porous medium (lithology). Without appropriate information of the lithology the interpretation of the *ECbulk* is therefore difficult. For example, an increase of the *ECbulk* may indicate brackish water or a clay layer (Figure D.3). The salinity of the pore water in clay is also difficult to deduce from solely *ECbulk* measurements. The *GR* values may be used to estimate the lithology and a qualitative influence of the lithology on the measured *ECbulk*.

Because the focus of the ground-truth was on the upper tens of meters of the subsurface, where the transition zone from fresh to brackish/saline groundwater was expected, most measurements were made to at least 50 m below ground level (bgl), except for 3-0082, where the bottom of the piezometer was at about 10 m bgl. At some locations deeper measurements were made. An overview of the measurement locations is given in Table D.1.

Table D.1 Some metadata of the measurement locations/piezometers. The Lambert 72 coordinate system is used.

Piezometer name	X coordinate (m)	Y coordinate (m)	Date borehole logging
3-0077	43724	198063	22-11-2017
3-0079	42448	187428	22-11-2017
3-0082	31686	194932	23-11-2017
3-0506b	36134	188655	22-11-2017
3-0513b	28714	182364	23-11-2017
3-0514	25786	190028	23-11-2017
3-0515b	48168	203275	22-11-2017
3-0518b	36065	195471	23-11-2017

D.1.3 Results

The results of the borehole logging are shown in the appendix of this memo, combined with the geology and, if available, the backfill and piezometer design of the borehole (see for an example Figuur D.4). These data have largely been taken from the online portal www.dov.vlaanderen.be and personal communication of the Vlaamse Milieu Maatschappij. Unfortunately, little direct lithological information was available. The geology was therefore used as an indication of the local lithology. Note that within the geological units, variation in lithology (e.g., sandy layers within clay units) is very likely.

Most measurements indicate a relatively sharp increase of the *ECbulk* within the upper ten meters of the subsurface, which may be related to the increase of the salinity of the groundwater. In 3-0518b and to a lesser extent 3-0079 the *ECbulk* values remain stable for a few meters, suggesting a relatively fresh groundwater zone here.

Below the transition zone from low to high *ECbulk* values, a thick zone of relatively stable *ECbulk* values is present. Also the *GR* values are higher. Both *ECbulk* and *GR* indicate the presence of a (sandy) clay unit, comprising the marine geological formations Tielt and Kortrijk. Note that heterogeneity (sandy / clayey layers) is likely present in this formation. At some locations, such as 3-0079, the underlying more sandy aquifer is detected (Hannut formation), characterized by a decrease of *ECbulk* and *GR* values.

The results of the borehole logs can be used for further analysis and ground truth within the FRESHEM Vlaanderen project. The logs are digitally available as ascii files, including depth to ground level (m), Time (s), Logging speed (m/min), Cable Tension (N), *GR* (gAPI), and *ECbulk* (denoted as 'IL.CNT' in the header, units: mS/m).

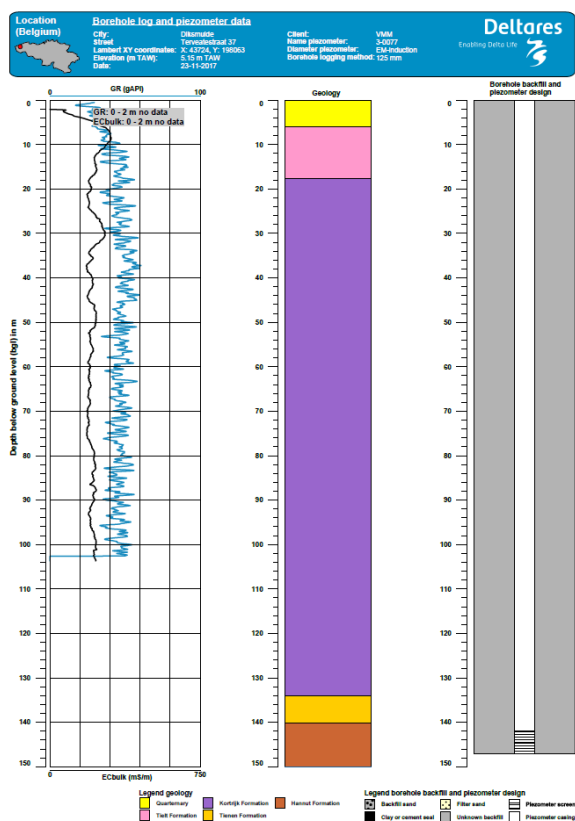


Figure D.5 Example SlimFlex result.

D.2 Surface ERT lines and SIP

Two surface ERT lines were performed in two different locations. The first surface ERT line was performed to the southeast of Avekapelle (Figure D.6). The survey was performed using the gradient array and 2 m electrode spacing.

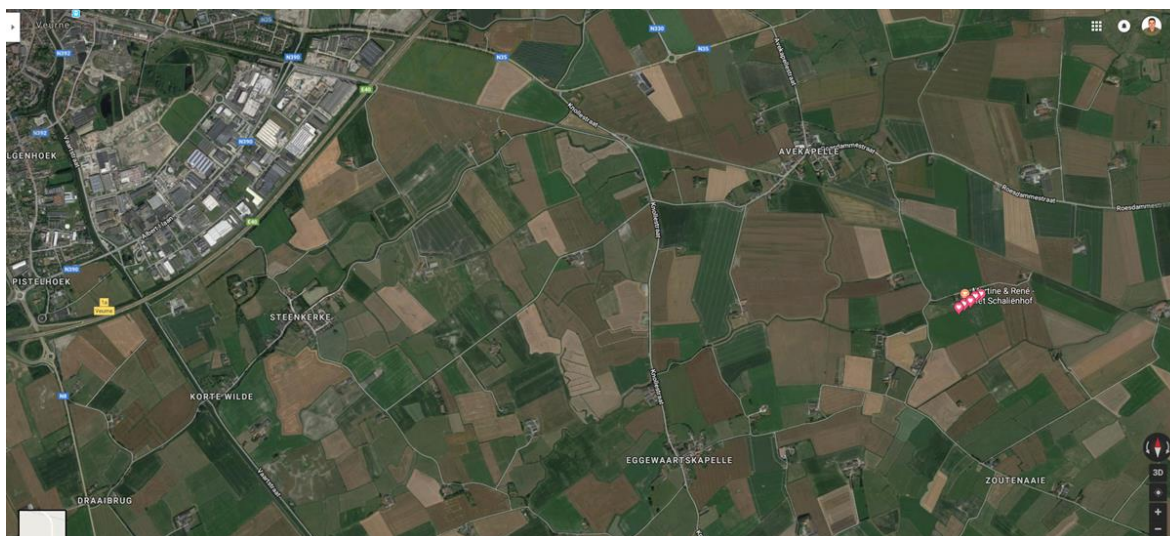


Figure D.6 Location surface ERT line Avekapelle.

The Avekapelle site yielded a good result of the surface ERT. Result of the data inversion is shown in Figure D.7. A clear freshwater lens is visible, that extends to a depth of 20 m below the surface.

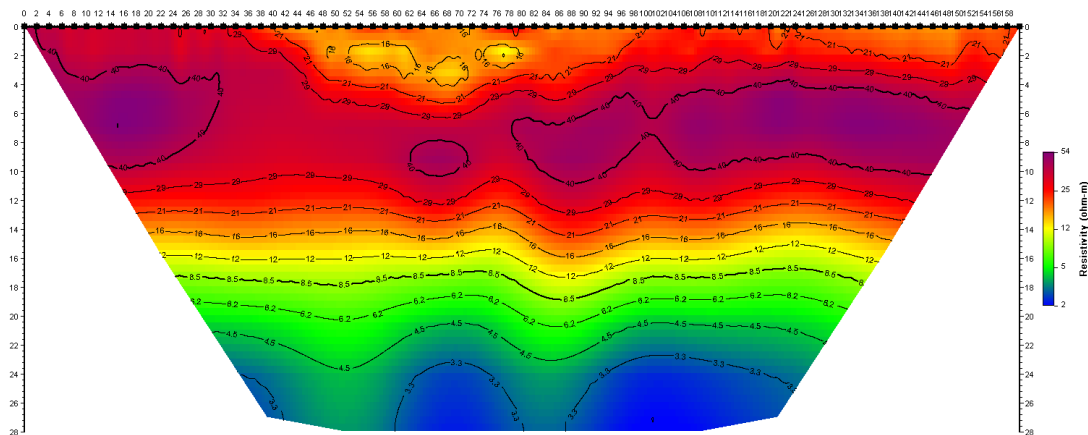


Figure D.7 Bulk resistivity obtained from ERT line Avekapelle.

At this site, also Spectral Induced Polarization (SIP) was attempted. SIP measures the frequency-dependent complex impedance, equivalent to the amount of resistance and phase shift between electric current and voltage. SIP aims to distinguish material properties of the subsurface, such as salinity and saturation. It was attempted to investigate whether SIP could be of value in determining the conductive properties of the sediment itself, and thereby help determine surface conductivity values. Figure D.8 and Figure D.9 give the results of the attempted SIP measurements. However, the results are not usable due to a hardware error. This error is presented in the extremely high phase values for the high frequencies.

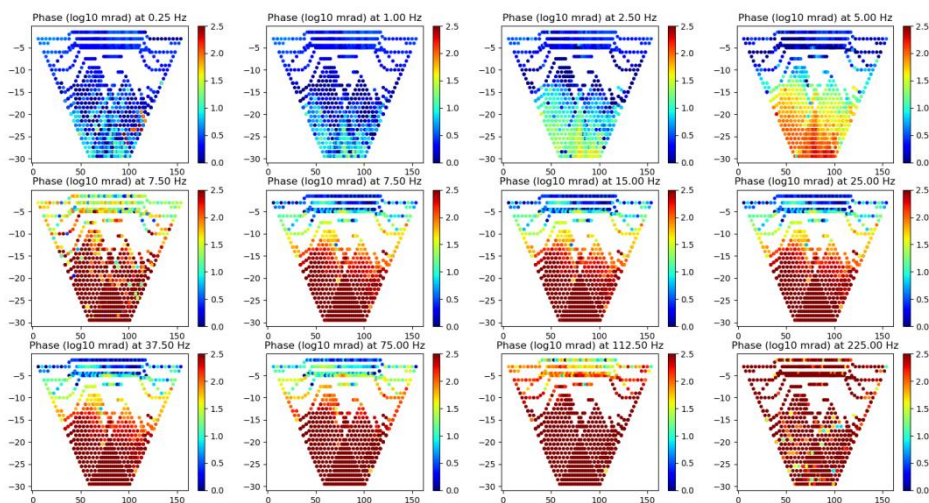


Figure D.8 Faulty SIP phase measurements from Avekapelle site.

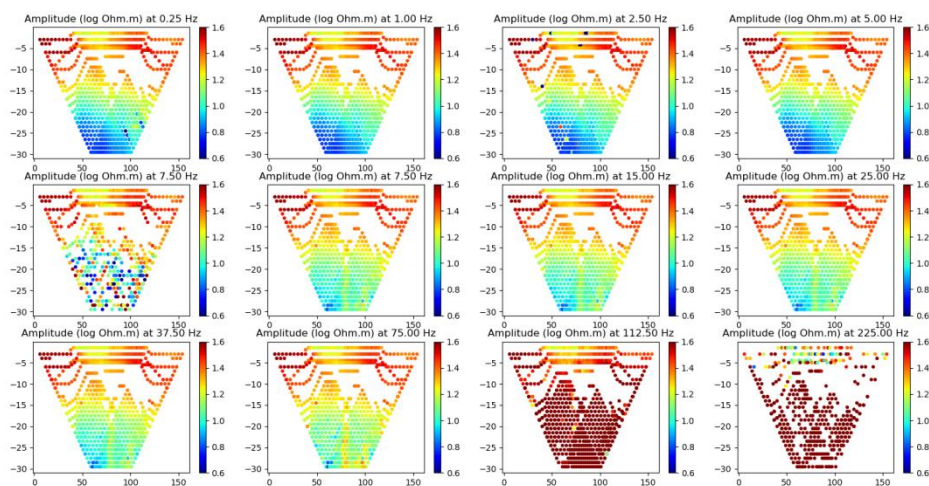


Figure D.9 Faulty SIP amplitude measurements from Avekapelle site.

The second surface ERT was performed in the Doornpanne dune area between the villages of Koksijde-Bad and Oostduinkerke-Bad (Figure D.10).

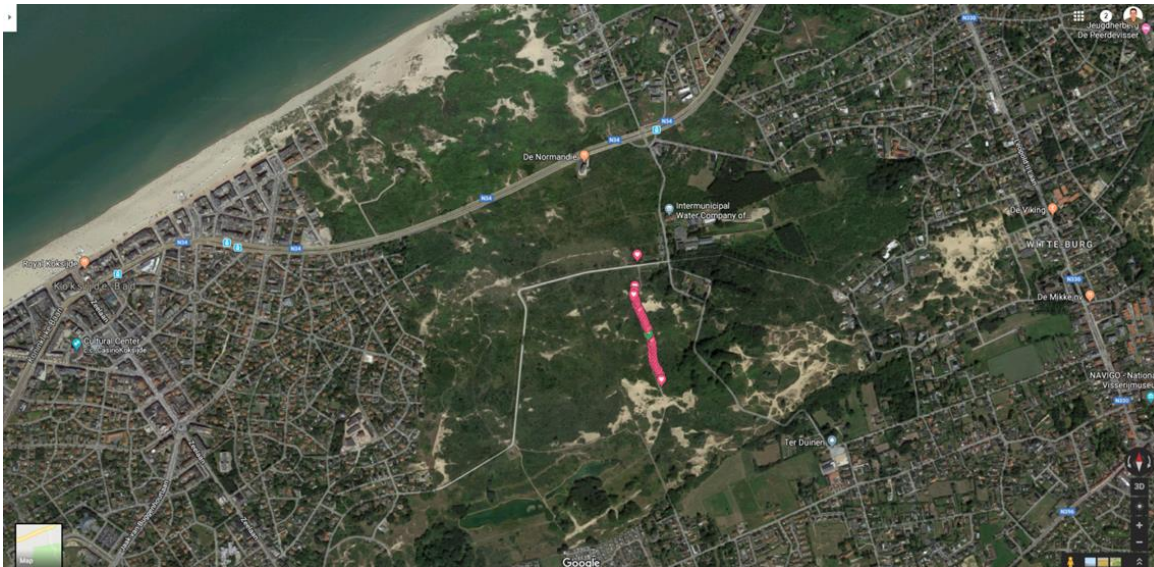


Figure D.6 Location surface ERT line Doornpanne.

Unfortunately, the shallow subsurface at the area was too dry for the electrodes to properly make contact. Therefore, a good inversion model could not be obtained.