

Verzilting in Zeeland – Inzichten, interpolatie en correlatie van Aquality App EC metingen

Internship Deltares

Naam: Stijn Eggenkamp

Studentnummer Universiteit Utrecht: 6593623

Begeleiders Deltares: Vince Kaandorp & Ilja America - van den Heuvel

Begeleider Universiteit Utrecht: Gualbert Oude Essink

Credits: 22 ECTS

Versie: Eindversie stageverslag

Datum: 09-08-2024



Foto's: Veldonderzoek om EC waarden van sloten te meten voor de Aquality App.

Samenvatting (Nederlands)

Tijdens mijn stage bij Deltares, startdatum 25 maart 2024, heb ik onderzoek gedaan naar alle electrical conductivity (EC) metingen die zijn uitgevoerd in Zeeland met de Aquality App en gekeken of er trends zichtbaar zijn en of er onzekerheden in de resultaten van de Aquality App bevinden. De EC metingen zijn verricht door boeren, scholieren en natuur beheerders, om zo meer inzicht te krijgen van de verzilting op Zeeland. Het hoofddoel is beter inzicht te bieden in de EC metingen en de bijbehorende onzekerheden die zijn uitgevoerd met de Aquality App in Zeeland, en uiteindelijk ook advies te geven om het enthousiasme bij de agrariërs hoog te houden zodat zij gemotiveerd blijven om metingen te verrichten met de Aquality App. Dit is gedaan door een statistische analyse en visualisatie uit te voeren van de beschikbare metingen met behulp van python en deze vervolgens te vergelijken met basisdata zoals FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland (FRESHM) en het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Er is een tijdserie van tot nu toe 15 maanden aan EC metingen die in dezelfde sloot zijn verricht. In de tijdserie is er een duidelijk verschil zichtbaar tussen de winter waar de EC gemiddeld rond de 2.0 mS/cm (agronomisch zoet) ligt en in de zomer oploopt tot 14.0 mS/cm (zeer brak/zout). Dit valt te verklaren doordat er in de zomer geen zoetwatertoevoer is terwijl er wel veel zoute kweldruk optreedt in de sloot. Ook zijn er in een korte periode veel EC waardes gemeten in aangrenzende sloten op Zeeuws-Vlaanderen. Deze metingen laten een verziltingsgradiënt over de lengte van sloten zien. Dit spatiele gradiënt is te verklaren aan de hand van de FRESHM kaart en het AHN. De praktijkervaringen met de Aquality App tijdens een veldwerkdag op Zuid-Beveland hebben verschillende meetonzekerheden aan het licht gebracht, zoals de onzekerheid over de exacte locatie van de EC meting. Tijdens dit veldwerk is de kreekrug op Zuid-Beveland zichtbaar gemeten met de Aquality App, en zijn er twee boeren bevraagd over het effect van de zoutconcentratie op de groei van hun gewassen. De handleiding van de Aquality App is geëvalueerd, waarna er enkele aanbevelingen zijn gedaan voor aanvullingen op de app. Op Terschelling is stratificatie gemeten in sloten, wat een onzekerheid introduceert in de methode waarmee water uit de sloot wordt genomen voor een EC meting. Daarnaast zijn op Terschelling twee raaien gemeten vanaf de Waddenzeedijk in de sloten naast de weilanden. Tijdens de verdiepende analyse is getoetst of interpolatietechnieken gebruikt kunnen worden om meer inzichten te geven van EC metingen over ruimte en tijd. Ook zijn er bij de verdiepende analyse correlaties aangetoond tussen de EC metingen en het AHN, de diepte van het FRESHM grensvlak (grens tussen agronomisch zoet en brak water) en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen. Afsluitend worden voorbeelden gegeven hoe de EC data gepresenteerd kan worden om boeren enthousiast te houden voor het verdere gebruik van de Aquality App, en worden er verschillende opties voor verdere analyse van de EC metingen besproken.

Inhoud

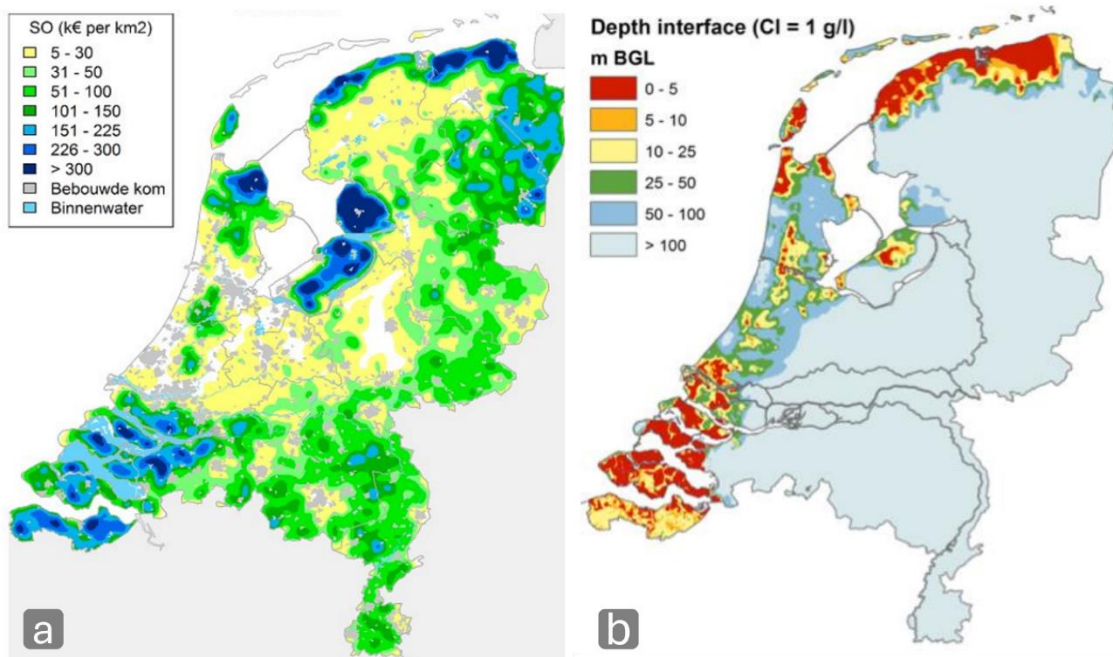
Samenvatting (Nederlands).....	2
1 Introductie.....	4
2 Doel van het stageonderzoek.....	6
3 Theorie.....	6
3.1 Ontstaan water situatie in de ondergrond van Zeeland.....	6
3.2 Interactie grondwater en slootconcentratie.....	9
3.3 Electrical Conductivity	10
3.4 Data interpolatie.....	12
4 Materialen en Methodes	14
4.1 Data.....	14
4.2 Aquality App python data analyse	15
4.3 Veldwerk Zeeland.....	16
4.4 Veldwerk Terschelling.....	17
4.5 Verdiepende analyse	17
5 Resultaten & Discussie.....	19
5.1 Aquality App EC data analysis	19
5.1.1 Tijdserie EC metingen.....	20
5.1.2 Verziltingsgradiënt Zeeuws-Vlaanderen	21
5.2 Veldwerk Zeeland - Aquality App	22
5.3 Veldwerk Terschelling – Stratificatie & Verziltingsgradiënt	25
5.4 Verdiepende Analyse	30
5.4.1 Interpolatie EC over tijd en ruimte	30
5.4.2 Correlatie en interpolatie van de EC metingen uit Zeeland.....	31
6 Conclusie.....	36
7 Aanbevelingen	37
Dankwoord.....	39
Bronnenlijst.....	39
Internship report summary (English)	44

1 Introductie

Deltares heeft de Aquality App (<https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/aquality-app>) ontwikkeld zodat agrariërs en waterbeheerders waterkwaliteit en nutriëntenverliezen op perceel niveau in kaart kunnen brengen. Met de Aquality App kunnen boeren en bewoners met behulp van een electrical conductivity meter (EC meter) zelfstandig de zoutconcentratie meten in oppervlaktewater, drainwater en grondwater. Voorheen kon er alleen nog nitraat gemeten worden en werd de app ook nog de Nitraat App genoemd, maar nu is de app verder ontwikkeld en is het ook mogelijk om eenvoudig zelf metingen te verzamelen van concentraties zout en andere nutriënten in het water (nitraat, ammonium en fosfaat) en van minerale stikstof gehalten in de bodem. Aan de hand van metingen met de Aquality App kunnen boeren meten of uitgevoerde maatregelen effectief zijn voor bijvoorbeeld een vermindering in verzilting. Het is van belang om effectieve methoden en resultaten van studies naar verzilting te rapporteren, omdat veel boeren afhankelijk zijn van de kwaliteit van de bodem. Gewassen kunnen minder goed groeien op bodems met een hoger zoutconcentratie (Olde, F. D. 2022). Met resultaten van veel verschillende onderzoeken is het op lange termijn mogelijk om de meest effectieve analysemethoden en toegepaste maatregelen om de zout concentratie in de bodem te verminderen vervolgens toe te kunnen passen in andere regio's die ook te maken hebben met verziltingsproblemen (Reimann et al., 2023). In de provincie Zeeland is er een project gestart om zoveel mogelijk boeren mee te laten doen met het verrichten van zout concentratie metingen. Wanneer veel verschillende boeren metingen uitvoeren vergroot het de ruimtelijke spreiding van data en kan er een grote langdurige dataset worden opgebouwd. Op dit moment is er al een database opgebouwd van EC metingen over een periode van 1.5 jaar, wat er voor zorgt dat er inzichten verkregen kunnen worden naar de verschillen in zout concentratie in sloten van Zeeland tussen de hydrologische zomer en winter en verzilting gradiënten kunnen zien in aansluitende sloten. Om meer inzichten te krijgen in seizoensgebonden en jaarlijkse trends moeten er wekelijkse of maandelijks metingen blijven worden verricht in dezelfde sloten en voor meerdere aansluitende jaren. En om goede ruimtelijke trends zichtbaar te maken is het belangrijk dat zoveel mogelijk mensen zoutconcentratie metingen verrichten op verschillende locaties.

Zeeland is de grootste akkerbouwprovincie en heeft per oppervlakte de meeste fruitteelt van Nederland. De akkerbouw in Zeeland heeft hierdoor ook een grote standaardopbrengst, wat te zien is op Figuur 1a. In de provincie Zeeland worden akkerbouwgewassen geteeld in de polders. Polders zijn laaggelegen gebieden waar kunstmatig het waterpeil beheerst wordt door één of meerdere waterkeringen om het land droog te houden en er zo te kunnen wonen en werken (Aydin, 2020; Nijhuis & Pouderoijen, 2013). Alle waterlopen of sloten die omgeven zijn door dijken zijn onderling verbonden door hydraulische constructies en zo kan ervoor worden gezorgd dat de grondwatervlucht in de polders dicht bij een streefniveau blijven (Aydin et al., 2016). Wereldwijd komen in de laaggelegen kust gebieden veel polders met akkerbouw voor en wonen er ook orde grootte 900 (Reimann et al., 2023). In deltagebieden, zoals de Mississippi Delta in Louisiana (Verenigde Staten), de Ganges-Brahmaputra Delta (Bangladesh) of de Rijn-Maas Delta (Nederland), kan zout grondwater naar de oppervlakte stromen en het zoete oppervlaktewater van de polders verzilt wat leidt tot verminderde vruchtbaarheid van de bodem (Aydin, 2020). In de toekomst worden veel laaggelegen kustgebieden onderworpen aan gevaren zoals verzilting, bodemdaling en zeespiegelstijging die groter kunnen worden door toename van de bevolking en mate van klimaat verandering (Reimann et al., 2023).

Verzilting is de toename van het zoutgehalte in de bodem, het grondwater en het oppervlaktewater wat er toe kan leiden dat er schade optreedt aan de groeiende gewassen (Olde, 2022) of de drinkwatervoorziening (Veraart et al., 2012). De diepte van het brakke grondwater in Zeeland ligt altijd al dichtbij het oppervlakte, zichtbaar gemaakt in Figuur 1b. Deze diepte wordt bepaald door de balans tussen zoetregenwater toevoer van boven en zoute kwel flux van onder. De kwel komt in toenemende mate binnen het bereik van plantenwortels en komt ook door de bodem in het grond- en oppervlaktewater terecht (Moens, Frank & Paulissen, M.P.C.P., 2009). Het is afhankelijk van de bodem condities in de ondergrond per locatie hoeveel zoetwater er beschikbaar is en hoeveel kwel flux er optreedt. De zoetwaterlaag is dikker in hoger gelegen relatief goed doorlatende zandige gebieden in vergelijking met slecht doorlatende kleigronden, die ook vaak lager gelegen zijn in het landschap en daardoor gevoelig zijn voor zoute kwel (Grond et al., 2018).



Figuur 1: a) : Kaart 1 Ruimtelijke verdeling van de standaardopbrengst van akkerbouw in 2017 van Nederland (Venema et al., 2019). b) Diepte van brakke grensovergang in Nederland (P. Vos, 2011).

In het volgende hoofdstuk wordt het doel van het stageonderzoek uitgelegd. Hoofdstuk 3 Theorie bevat achtergrond informatie over de ondergrond van Zeeland, grondwater en slootconcentratie, EC en data interpolatie. In hoofdstuk 4 worden de Materialen en Methodes van het onderzoek uitgelegd. Eerst wordt de gebruikte Aquality App data gepresenteerd gevolgd door de uitleg van de python data analysis, veldwerk methodes en verdiepende analyse. Hoofdstuk 5 Resultaten & Discussie laat alle gemaakte tabellen, plots en foto's zien die helpen met het beantwoorden van de onderzoeksvragen. De resultaten zijn ook geanalyseerd en vergeleken met andere onderzoeken. De conclusie van het onderzoek staat in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 Aanbevelingen geeft: aanbevelingen voor de Aquality App, een geüpdatete afbeelding van alle EC metingen die uitgevoerd zijn in Zeeland en suggesties voor een vervolgonderzoek. Na de aanbevelingen komt het Dankwoord en de Referenties. Aan het einde van het verslag staat nog een lange Engelstalige samenvatting van het stageverslag.

2 Doel van het stageonderzoek

Het belangrijkste doel is om meer inzicht te geven in de EC metingen en bijbehorende onzekerheden, die zijn gedaan met de Aquality App in Zeeland en uiteindelijk ook om advies te kunnen geven, zodat het enthousiasme onder boeren en de bevolking in Zeeland groot blijft om door te gaan met het doen van metingen voor de Aquality App.

Dit is gedaan door:

1) een statistische analyse en visualisatie uit te voeren van de beschikbare EC metingen uit de provincie Zeeland, om zo inzichten te krijgen in hoeveel data er is, waar er overal gemeten is en hoe vaak er op locaties gemeten is. En de locaties van de gemeten waarden te vergelijken met het AHN en FRESHEM, met als doel om te achterhalen of de gemeten waarden zo te verklaren zijn.

3) Veldmetingen uit te voeren, met als doelen:

- meet onzekerheden te identificeren die in de praktijk optreden bij het gebruik van de Aquality App,
- er stratificatie in de sloten plaats vindt,
- onderzoeken hoe de boer in praktijk omgaat met zijn slootwater en
- meer data verzamelen die kan worden gebruikt voor de verdiepende analyses.

3) verdiepende analyses van de beschikbare metingen uit te voeren. Door te toetsen of de toegepaste interpolatietechnieken gebruikt kunnen worden om meer inzichten te geven van EC metingen over ruimte en tijd. En door te kijken of er correlaties zichtbaar zijn tussen de EC waarde en kenmerken van de meetlocatie zoals het AHN, FRESHEM diepte van het grensvlak en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen.

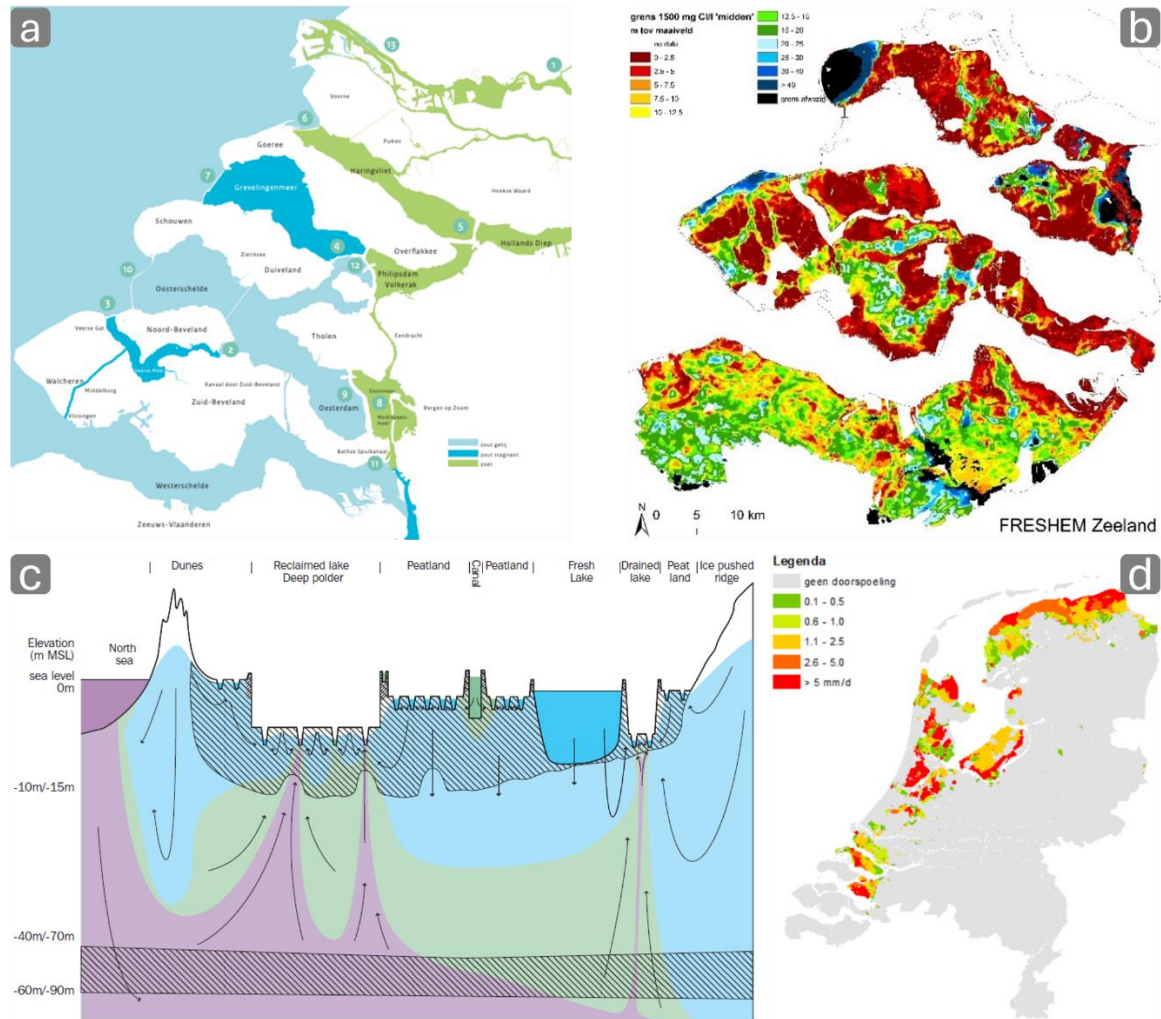
3 Theorie

3.1 Ontstaan water situatie in de ondergrond van Zeeland

In de eerste eeuwen van de jaartelling zijn er eilanden gevormd door het ononderbroken veenlandschap van Zeeland weg te slaan tijdens overstromingen. Voordat Zeeland werd bedijkt en ingepolderd (<1000 A.D.) was het ook nog een open systeem met de zoute zee waar het eerste watervoerende grondwater pakket in verbinding mee staat. Toen was ook al het oppervlakte water nog zout en was er nog helemaal geen zoetwater tot beschikking in Zeeland. De eilanden zijn gevormd door overstromingen en inpolderingen. Vanaf 1000 A.D. zijn er duinen gevormd en zijn de bewoners begonnen met omdijken en inpolderen van gebieden. Veenlagen zijn ingeklonken en kleibodems gerijpt doordat dijken werden aangelegd en gebieden werden ontwaterd door gegraven sloten en greppels. De vaak laaggelegen slecht doorlaatbare klei op veen bodems worden ook wel poelgronden genoemd. De zanderige kreken, die een stuk minder zijn ingeklonken omdat ze uit een mix van rivierafzettingen en dekzand bestaan, steken nu boven de poelgronden uit en worden daarom kreekruggen genoemd (P. Vos, 2015; P. C. Vos & Knol, 2015).

Nu wordt er via de rivieren ook zoetwater aangevoerd naar Zeeland, Figuur 2a geeft de zoet-zoutwaterscheiding aan voor de grote oppervlaktewateren. Afhankelijk van de zeespiegelstand en de afvoer van rivierwater is het water rond de eilanden van Zeeland: zout, brak, of zoet. Een lage rivierafvoer betekent hogere zoutconcentraties verder landinwaarts, ondanks de dammen en sluisen (Rijkswaterstaat, 2021). Het grote zoetwatermeer, Volkerak-Zoommeer, heeft zouttoevoer van seepage 17 % maar ook via sluisen 83% (plan van aanpak IJza, 2023). Bovenop het zoute grondwater zijn in de loop der jaren zoetwaterlenzen ontstaan via regenwater dat infiltreert de bodem. De grens tussen zoet en brak/zout grondwater in het grondwater is beter zichtbaar gemaakt met FRESHEM, zie Figuur 2b. Preferentiële grondwaterstroming in de diepe polders van Zuid-Holland zorgt ervoor dat het zoute grondwater in verbinding kan komen te staan met de zoete oppervlakte aquifer, waardoor er verzilting optreedt (Hagedooren, 2018). Iedere polder is gescheiden van het omliggende hydrologische systeem waardoor de verzilting niet makkelijk kan verspreiden naar een aanliggende polder (Hoes and Van de Giesen, 2015, p. 15). Al kan verdere bodemdaling er in de toekomst voor zorgen dat de mate van verzilting versnelt (Aydin, 2020). Soms komt de kwel direct uit in een oppervlakte sloot wat ervoor zorgt dat de omliggende sloten ook makkelijker kunnen verzilten (de Louw, 2013), ook zichtbaar in de doorsnede van Zeeland in Figuur 2c.

Een methode die wordt toegepast om verzilting van het oppervlaktewater tegen te gaan is om de polders met zoet water uit de Maas of Rijn te doorspoelen. Het doorspoelen wordt gedaan om zoet water van voldoende kwaliteit in de polders te hebben om zoetwaterlandbouw te kunnen bedrijven, de gebieden die een doorspoelbehoefte hebben zijn zichtbaar in Figuur 2d. Een waterschap houdt in een control room alles in de gaten en kan bepalen of het nodig is om water uit de rivieren door te spoelen in de polders via sloten, kanalen en gemalen. Efficiënt waterbeheer in de polders kan gecreëerd worden door gebruik te maken van een Model Predictive Control om aan de toenemende doorspoeldebieten te voldoen (Aydin, 2016; Aydin, 2020).

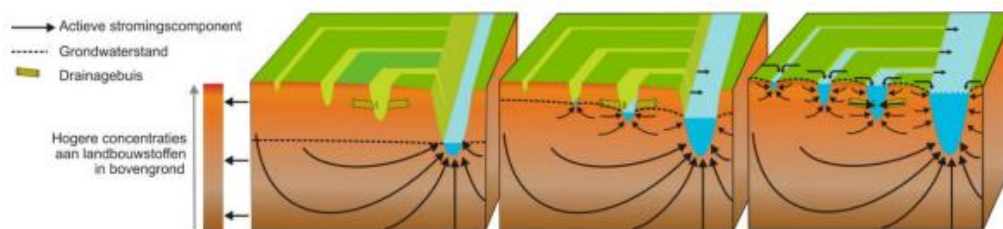


Figuur 2: a) Deltaplan: De Philips- en Oosterdam scheiden het zoete Volkerak-Zoommeer van de zoute Oosterschelde (Rijkswaterstaat, 2021). b) FRESHEM Zeeland, diepte van de 1500 mg Cl/l grens ('landbouwkundig zoet') ten opzichte van maaiveld voor 'midden' (Delsman et al., 2018, overgenomen van: Van Baaren et al. 2018). c) Kwel- en infiltratiegebieden en de zout concentratie van het grondwater, schematisch weergegeven voor een profiel loodrecht op de Brabantse wal, Zeewse polders en de duinen. (de Louw, 2013). d) Berekende theoretische doorspoelbehoefte om een streefconcentratie van 250 mg/l in Nederland in het polderwater te bereiken (Slimmer Doorspoelen - Zoetzout - Deltares Public Wiki, 2017.)

Het regenwater kan in de zandige duinen een grote zoetwaterbel vormen. Het zoete water drijft op het zoute water en wanneer de opbolling van de grondwaterstand in de duinen bekend is, geeft de formule van Ghijben-Herzberg de diepte H van de zoetwaterbel. De formule is alleen voor ideale situaties, en die komen zelden voor. Zo is de diepte van de ook afhankelijk van de diepte van de ondoorlatende lagen in de ondergrond en deze is deze Nederland maximaal 15-25 meter diep (Carlston, C. W. 1963, Drabbe & Badon Ghijben 1989). En is er een correctie factor nodig in de formule van Ghijben-Herzberg is later een correctie factor toegevoegd, omdat de oorspronkelijke formule geen rekening houdt het mixen van het zoute met het zoete water en de dispersie factor (Pool & Carrera, 2011). In Zeeland heeft De Louw et al. (2015) met behulp van veldonderzoek aangetoond dat regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden minder dan 2 meter diep zijn en in vele gevallen ontbreekt, (Oude Essink et al. 2007). De regenwaterlenzen voorkomen dat zout kwelwater de wortelzone bereikt via capillaire opstijging en zijn daarom van groot belang voor de landbouw. De ondiepe ligging van de regenwaterlenzen maakt ze ook erg kwetsbaar voor klimaatverandering. Drogere zomers zullen namelijk leiden tot nog dunnere lenzen en hogere zout concentraties door verdamping.

3.2 Interactie grondwater en slootconcentratie

Zoet water infiltratie in de onverzadigde zone van regen gaat via de macroporiën vanaf het oppervlakte. Terwijl zout water infiltratie in de onverzadigde zone gaat via capillaire werking via de kleine poriën vanaf het (zoute) grondwaterniveau. Het is hierom belangrijk om voldoende te blijven irrigeren op een polder, zodat deze niet verzilt door zoute kwel. Een hoge grondwaterstand van de bodems wordt afgevoerd door drainagebuizen en sloten, zo komt het grondwater in verbinding met het oppervlaktewater. Afhankelijk van afvoeromstandigheden wordt een bepaalde mengverhouding van het zoute grondwater en zoete oppervlakte water afgevoerd, zie Figuur 3 uit Rozemeijer & Broers (2007). De kweldruk, die op deze manier makkelijk tot aan het oppervlakte water komt, verzilt de sloten om de polders heen. Zoete grondwater bronnen kunnen tijdelijk gebruikt worden om de bufferlimiet van oppervlakte water te verhogen of zout irrigatie water te verdunnen en daarbij de irrigatie water stress te verminderen. Een lager grondwaterstand kan ervoor zorgen dat de drainage goot in droge zomers alleen maar wordt gevuld met zoute kweldruk. Boeren op een kreekrug, grote zoetwaterbel, kunnen in een droge zomer ook teveel grondwater onttrekken dat ze op een gegeven moment zoute kwel onttrekken. Het onttrokken grondwater wordt door de boeren op de polder gebruikt, wat vervolgens door drainagebuizen beland in de sloten en oppervlakte wateren. De verzilting kan toenemen in de toekomst wanneer de drogere periodes langer worden, het regenwater te snel wordt afgevoerd door drainage buizen en verdamping van het grondwater (de Louw et al., 2015). En kweldruk kan toenemen wanneer de zeespiegel stijgt of wanneer er bodemdaling plaatsvindt in de toekomst, omdat de druk op het zoute watervoerende grondwater pakket toeneemt. De Louw et al. (2015) ziet ook een manier om de mogelijk negatieve gevolgen van klimaatverandering in te perken door alternatieve configuraties van drainagetegels, die de opslag van geïnfiltererd zoet water in regenwaterlenzen bevorderen. Op Texel is het nodig om 15% van het jaarlijkse neerslag vast te houden om voldoende water te hebben om de landbouw op Texel te voorzien. Er is in het project 'Zoete Toekomst Texel' 3 jaar lang onderzocht of het regenwater vanaf het najaar in de grond kan worden opgeslagen om het dan in de zomer vervolgens op een zuinige en slimme manier te gebruiken om 50 tot 100 hectare aan akkers te irrigeren.



Figuur 3: Conceptueel model over de relaties tussen hydrologie en waterkwaliteit in bodem-, grond- en oppervlaktewater: de oppervlaktewaterkwaliteit is afhankelijk van de afvoer een bepaalde mengverhouding van grondwater afkomstig vanuit de verschillende diepteniveaus (Rozemeijer & Broers, 2007).

De verzilting in Zeeland verschilt per locatie en ook per periode. Zo kan een sloot in de winter wel zoet zijn maar in de zomer zout worden. Het is erg belangrijk om te weten wat de slootconditie is op het moment van meten. Zo is het ook mogelijk dat er stratificatie in de sloot ontstaat, waarbij de zoute kwel zich onderin de sloot bevindt en daarbovenop drijft het zoetere irrigatie water. Stratificatie vindt vooral plaats in stilstaande sloten waar de wind ook geen golven kan creëren op het oppervlakte. Uit het onderzoek van Delsman et al. (2014) blijkt dat het grootste deel van het water in de sloot en de zoutconcentratie afhangt van het afstromende water van het landbouwperceel. De snelheid van dit afstromende water met

een lagere zoutconcentratie wordt bepaald door de snel reagerende drukverdeling in de ondergrond, grondwaterniveau. In de zomer is de waterafvoer van het landbouwperceel lager door minder neerslag en meer verdamping en dan wordt de sloot ook gevuld met zout kwelwater dat langzaam naar de oppervlakte stroomt. Nu is het mogelijk om met de Aquality App de lokale verschillen in kaart te brengen. Met de app kan een EC meting in oppervlaktewater en grondwater uitvoert worden om de zoutconcentratie te bepalen en dit resultaat opslaan op de bijbehorende gps locatie van de meting. Na ruim twee jaar aan metingen door boeren en natuurbeheer in de provincie Zeeland is er een onderzoeksproject gestart vanuit Deltares in samenwerking met Provincie Zeeland om de gemeten data te analyseren en uiteindelijk de resultaten met bijbehorend advies over het watergebruik te delen met de lokale boeren.

3.3 Electrical Conductivity

De EC metingen worden veelal uitgevoerd met een Hanna Dist4 EC meter, een afbeelding hiervan is zichtbaar in Figuur 4a. Dit apparaat meet de snelheid van de elektrische geleidbaarheid van een oplossing over een cm met behulp van een elektrode en wordt uitgedrukt in de eenheid $\mu\text{S}/\text{cm}$. EC metingen om een hele sloot in te meten (EC routing) worden uitgevoerd met een CTD diver (Conductivity, Temperature, en Depth meter) vastgemaakt aan een touw en visdopper (Hagedooren, 2018), waarvan een afbeelding zichtbaar is in Figuur 4b. De geleidbaarheid van het water is afhankelijk van welke zout moleculen er in de bodem bevinden (formatie factor) en de temperatuur. Veldmetingen van EC a vereisen kalibratie naar het werkelijke zout concentratie door laboratoriumanalyse (Rhoades, 1996). En hoewel de procedures voor het meten van de zout concentratie in de bodem relatief eenvoudig lijken, hebben verschillen in methodologie een aanzienlijke invloed op de gemeten waarden en de interpretatie van de resultaten (Hardie & Doyle, 2012). Waardoor het belangrijk is om verdiepend onderzoek uit te voeren naar de nauwkeurigheid van de EC metingen in de Aquality App.



Figuur 4: a) Hanna Dist4 EC meter wordt gebruikt voor EC meting en maakt het mogelijk de meting makkelijk te delen via de Aquality App (Nitrate App/Deltares Aquality App | Deltares). b) Een CTD-Diver, ook EC meter, die wordt gebruikt voor het verrichten van slootmetingen over de hele lengte wanneer deze aan een vishengel wordt vastgemaakt (CTD-Diver - Water Services and Technologies).

De elektrische geleidbaarheid [25°C $\mu\text{S}/\text{cm}$] wordt vaak ook uitgedrukt in chloride concentratie [mg/l] om metingen makkelijker te kunnen vergelijken met metingen buiten Nederland waar chloride concentratie gemeengoed is, al is de elektrische geleidbaarheid ook afhankelijk van andere stoffen zoals HCO_3^- (Goes et al., 2009). De Louw (2011) heeft door middel van een lineaire regressie analyse van 79 grondwater monsters en een bodembeschrijving van Zeeland een kalibratiecurve gemaakt met bijbehorende formatie factor om de EC metingen om te

rekenen naar chloride concentraties. De relatie is: $Cl [g L^{-1}] = 0.36 * EC [mS cm^{-1}] - 0.45 \rightarrow EC [mS cm^{-1}] = (Cl [g L^{-1}] + 0.45) / 0.36$ voor metingen in Zeeland. De EC metingen worden omgerekend naar chloride concentraties omdat het de dominante stof is in het verziltingsmechanisme en het een conservatieve stof is die geen verlies leidt door biochemische afbraak of chemische reacties, al is de EC waarde ook afhankelijk van andere stoffen. Een handige vuistregel die ook voor oppervlaktewater gebruik kan worden is: $Cl [g L^{-1}] = EC [mS cm^{-1}] / 3$ (Conversion EC to Chloride - Zoetzout - Deltares Public Wiki, 2015.). De relatie van De Louw (2011) wijkt af bij lage EC waarde wanneer deze vergeleken worden met andere formules, zoals in Stuyfzand (2014) en Goes et al. (2009). De chloride concentraties worden ook in toenemende mate gebruikt voor de classificatie voor zoet, brak en zout water (Oude Essink, 2001). Afhankelijk van het beoogde gebruik van het oppervlakte- en/of grondwater bestaan er echter verschillende classificaties voor zoet, brak of zout water. De term zoet grondwater heeft bijvoorbeeld een andere betekenis voor een uienteler dan voor een graskweker. De eerste classificatie voor grondwater, die nog steeds veel wordt gebruikt, was gemaakt door Stuyfzand (1986). In de Zeeuwse Delta is de term 'agronomisch zoet', die 1000 mg Cl/l definieert als de grens tussen zoet en brak grondwater, geïntroduceerd omdat het grondwater van nature zelden onder de 150 mg Cl/l komt. De huidige legenda van de Aquality App is weergegeven in Tabel 1, hierbij zijn in de tweede kolom de EC waarden omgerekend naar Cl concentraties door gebruik te maken van de vuistregel. Een voorstel van Vince Kaandorp was om een op chloride concentratie gebaseerde legenda te gebruiken, zie Tabel 2 en Figuur 5, die redelijk overeen komt met de legenda van de Aquality App. Deze onderste grens van <0.65 g/l is goed voor irrigatie bij akkerbouw en consistent met de Aquality App, deze wordt in dit verslag aangenomen als agronomisch zoet. Het is belangrijk om op te merken dat dit nog te brak voor gebruikers van drinkwater, natuur en tuinbouw.

Tabel 1: Legenda Aquality App 24-06-2024

EC [mS/cm]	Cl [g/l]	Benaming	Kleur
>15.0	>5.0	Zout	Donkerblauw
4.0 – 15.0	1.33-5.0	Brak	Blauw
2.0 – 4.0	0.67-1.33	Licht brak	Licht blauw
<2.0	<0.67	Zoet	Wit blauw

Figuur 5: Chloride concentraties zoet-zoet, zoet, brak, zout, zout-zout.

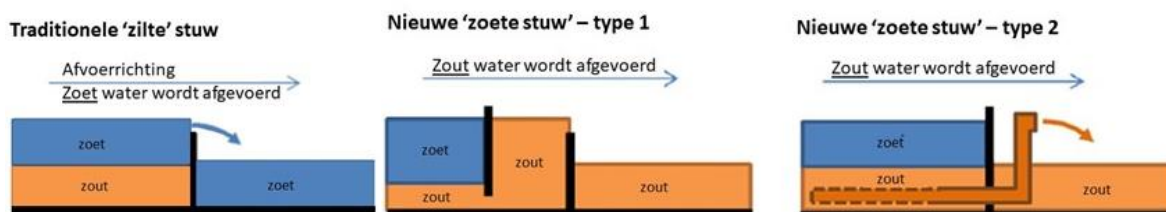
Tabel 2: Nieuwe Legenda gebaseerd op Cl, $EC [mS cm^{-1}] = (Cl [g L^{-1}] + 0.45) / 0.36$.

Chloride concentratie [g/l]	EC [25°C mS/cm]	Kleur
>5.00	15.14	Donkerrood
2.00 – 5.00	6.81 – 15.14	Rood
1.00 – 2.00	4.03 – 6.81	Wit/grijs
0.65 – 1.00	3.06 – 4.03	Blauw
<0.65	< 3.06	Donkerblauw



Het is belangrijk voor het uitvoeren van een EC meting om te weten of er stratificatie in de sloot aanwezig is. In gebieden met kwel van brak (>1000 mg/l) tot zout (>2000 mg/l) grondwater vertonen veel watergangen een stratificatie in de zout concentraties. Het zoute kwelwater treedt onderin de watergangen uit. Het zoete water van de percelen, wat voornamelijk uit neerslagwater bestaat, komt uit van boven en opzij in de watergangen via drains en greppels. Wanneer er geen stroming in de sloot staat en het dichtheidscontrast hoog genoeg is blijft het

“zoete” perceelwater drijven op het “zoute” kwelwater, op Terschelling heb ik hier onderzoek naar gedaan. De diepte waarop een EC meting uitvoert wordt in een gestratificeerde sloot heeft dus invloed op het resultaat. Door het uitvoeren van veldmetingen kan er gemeten worden hoeveel stratificatie er daadwerkelijk optreedt in de sloten. Om de dichtheid in kg/m^3 (ρ) te berekenen van de zout concentratie in mg/l chloride (Cl) de formule $\rho(C[Cl]) = \rho_f(1 + \beta_c C[Cl])$ gebruikt waar $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, β_c , de volumetrische concentratie expansiegradiënt [$1/\text{m}^3$], bijvoorbeeld $\beta_c = 1.34 \cdot 10^{-3} \text{ l/g}$ voor Cl⁻ (Oude Essink et al., 2010). Om ervoor te zorgen dat het zoute water uit de poldersloten verdwijnt en het zoete water achter blijft bij de polder, is er onderzoek gedaan door Acacia naar de Zoete Stuw, twee types van een nieuwe ‘zoete stuw’ zijn zichtbaar in Figuur 6. Een traditionele stuw zorgt er namelijk voor dat vooral het zoete water afgevoerd wordt, wat de boeren liever willen bewaren voor bijvoorbeeld beregening. Het resultaat van de nieuwe ‘zoete stuw’, gedwongen afvoer over de bodem door een onderspuier of een drain op de bodem, is dat de hoeveelheid zout in de watergang bovenstrooms tot 85 % gereduceerd wordt. De ‘zoete stuw’ houdt alleen geen rekening met de mening van het zoete en zoute water door golven, stroming, wind en/of kwelstroom. Wanneer het zoete en zoute water gemengd word neemt de effectiviteit af van de onderspuier, daarom is het belangrijk om bij het veldwerk inzichten te verkrijgen naar de slootcondities, die effect hebben op de mogelijke stratificatie in de sloten.



Figuur 6: Oplossingen om verzilting tegen te gaan door de introductie van een nieuwe ‘zoete stuw’ (Velstra, 2023).

3.4 Data interpolatie

Aan de hand van de EC metingen is het mogelijk om een data interpolatie uit te voeren over een gebied en/of tijd. De data interpolatie is een groot onderdeel van de verdiepende analyse van dit onderzoek. Het doel van een interpolatie over tijd is om een voorspelling te kunnen doen van een EC waarde, op een locatie waar al vaker EC metingen zijn uitgevoerd, in de toekomst. En het doel van een interpolatie over een gebied is om een voorspelling te kunnen doen van de EC waarde op een locatie waar geen eerdere EC metingen zijn uitgevoerd. Er bestaan veel verschillende interpolatie methodes, zoals Neural Networks, Natural Neighbor Interpolation en Kriging, de interpolatiemethodes zijn gevisualiseerd in Figuur 7 en worden kort uitgelegd in de volgende alinea.

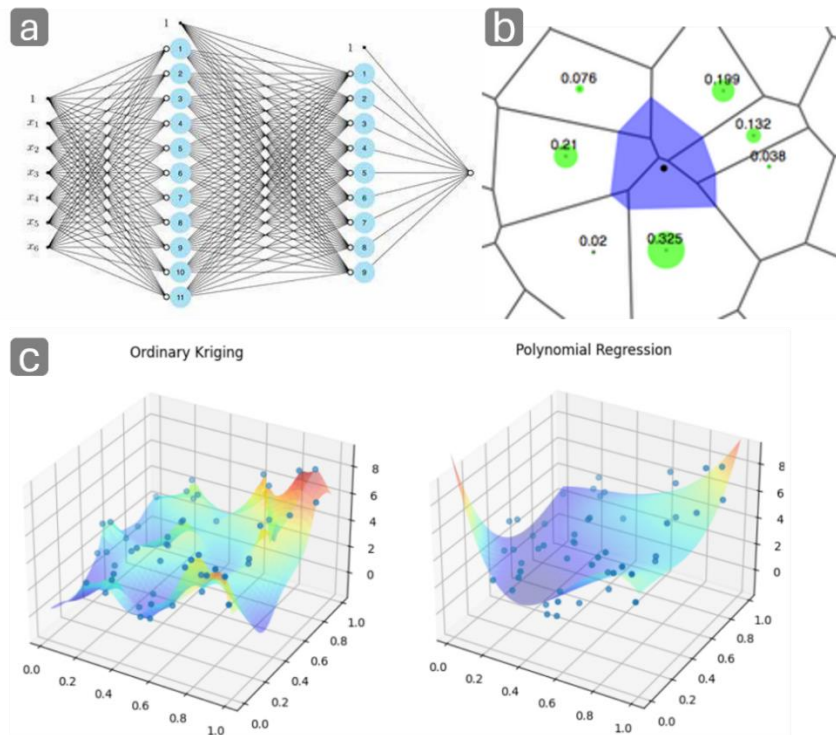


Figure7: a) Een visualisatie van een volledig verbonden Neural Networks. b) Een visualisatie Natural Neighbor Interpolation met Sibson-gewichten (groen) en Voronoi-cel (wiskundig opdeling in veelhoeken van een metrische ruimte, paars). De gewichten vertegenwoordigen de snijvlakken van de paarse cel met elk van de zeven omringende (Natural Neighbor Interpolation - Wikiwand). c) visualisatie 2D-gegevensregressie: Python Gewone Kriging-interpolatie en Polynominal regression (2D Data Regression, 2021).

Een Neural Network is een vorm van machine learning die neuronen gebruikt, celtypes die gespecialiseerd zijn in het overbrengen van informatie. Het is geïnspireerd op een biologisch denkpatroon, waarmee een computer informatie verwerkt en kan leren van observatiegegevens. Het probeert aan de hand van meerdere lagen van neuronen, criteria, een juiste waarde te voorspellen op een onbekende locatie. De sterkte van de neuronenverbindingen worden aangepast tijdens de data training om de voorspellingen te verbeteren. Het heeft veel trainingsdata nodig om een goed model te worden (Nielsen, 2015). Een Natural Neighbor Interpolatie gebruikt Voronoi vlakvulling, een geometrische structuur die een gegeven ruimte in gebieden verdeelt op basis van de afstand tot een set gegevenspunten. Op basis van de waarden van de omringende ruimtes schat de Natural Neighbor Interpolatie de beste waarde. De gebruikte formule om waarden te schatten is gebaseerd op de geometrische relatie van de punten (Sibson 1981). En Kriging is een geostatistische methode die ruimtelijke correlatie modelleert. Kriging geeft niet alleen een schatting van een geïnterpoleerd punt, maar ook maatstaven voor onzekerheid. De formule die Kriging gebruikt omvat variogrammodellering, een variogram is een functie die de mate van ruimtelijke afhankelijkheid beschrijft van een ruimtelijk willekeurig veld en wordt gebruikt om de variabiliteit tussen gegevenspunten als functie van de afstand weer te geven, en het oplossen van een stelsel lineaire vergelijkingen. Het aanpassingsvermogen van Kriging maakt het goed toepasbaar op het gebied van geografische gegevens (Benjamin Murphy et al., 2024). Wanneer data geïnterpoleerd wordt kunnen er verschillende gegevens worden toegevoegd, zoals neerslagdata of waterwegenkaarten om de interpolaties nauwkeuriger te maken. En met achterliggende kennis van het gebied en rekening houdend met onzekerheden van de data levert de data interpolatie na meerdere iteraties hopelijk bruikbare trends op om te kunnen voorspellen welke sloten altijd zoet zijn, welke altijd zout zijn en welke van winter naar zomer veranderen in zout concentratie.

4 Materialen en Methodes

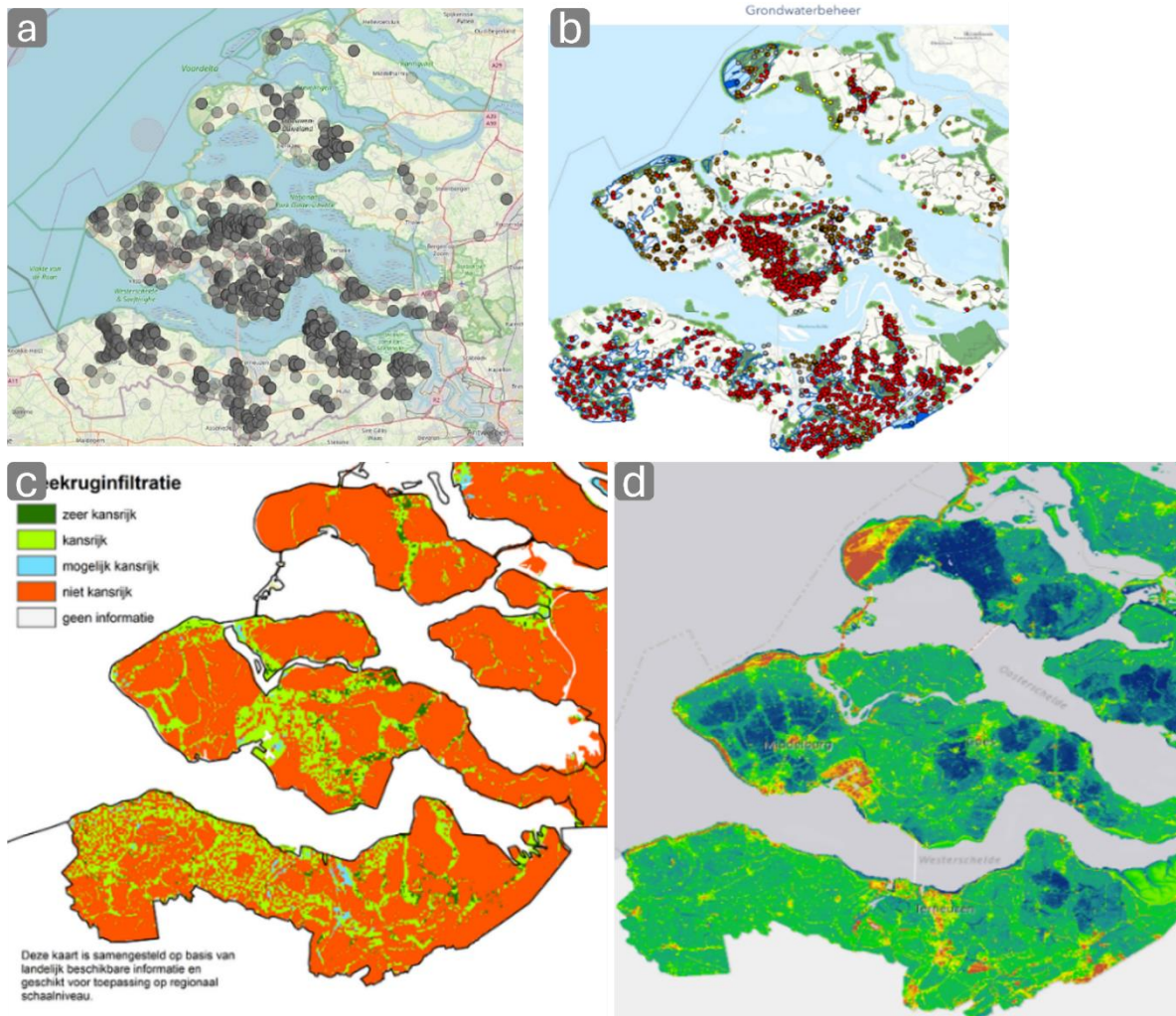
4.1 Data

De data die word onderzocht is alle EC data uit Zeeland van de Aquality App, [Aquality App \(Nederlands\) - the Deltares Aquality App - Deltares Public Wiki](#). Er zijn ook nog wel andere EC databronnen beschikbaar, zoals de EC metingen (+ temperatuur) in Tholen vanaf 2023 van waterschap Scheldestromen, alleen worden in dit onderzoek buiten beschouwing gehouden. De eerste meting van de Aquality App uit Zeeland door een boer is verricht op 18 november 2022. Voor de stageopdracht is er een data analyse uitgevoerd op de EC data uit Zeeland tot en met 17 juli 2024. De gemeten EC waarden zijn gekoppeld aan de gps coördinaten van de meting, zichtbaar in Figuur 8a. Tabel 3 geeft een overzicht van de EC metingen uit de Aquality app, ze zijn hier al gescheiden per regio, hydrologische zomer en winter, oppervlakte en aantal metingen per oppervlakte. Door veldonderzoek te doen kan de handleiding van de Aquality App worden geëvalueerd, om te kijken naar de onzekerheden van de Aquality App data. Veldwerk draagt er ook aan bij om te kijken hoe de boer in praktijk omgaat met zijn slootwater. Het veldonderzoek helpt met het invullen van ruimtelijk ontbrekende data. Met de extra data en met behulp van python wordt in de verdiepende analyse onderzocht of interpolatietechnieken gebruikt kunnen worden om meer inzichten te geven van EC metingen over ruimte en tijd. En wordt er onderzocht naar correlaties tussen de EC waarde en kenmerken van de meetlocatie.

Tabel 3: EC metingen uit de Aquality app gescheiden per regio, hydrologische zomer en winter, oppervlakte regio, metingen per oppervlakte regio en het percentage van het aantal metingen ten opzichte van het totaal.

Regio	Aantal metingen	Hydrologische zomer (1 april - 30 september)	Hydrologische Winter (1 oktober - 31 maart)	Oppervlakte regio [km ²]	Aantal metingen per oppervlakte regio [per km ²]	Percentage van het aantal metingen t.o.v. het totaal [%]
Zeeuws-Vlaanderen	2185	1095	1090	733.2	2.98	39.3
Zuid-Beveland	2073	829	1244	344.3	6.02	37.3
Walcheren	568	242	326	215.7	2.63	10.2
Noord-Beveland	169	34	135	86.0	1.97	3.0
Tholen	3	0	3	125.0	0.02	0.05
Schouwen-Duiveland	566	293	273	231.0	2.45	10.2
Totaal	5564	2493	3071	1735.2	3.21	100.0

Naast de data van de Aquality App kan er gebruik worden gemaakt van verschillende andere databronnen om meer inzichten te krijgen. Zo geeft de FRESHM kaart, Figuur 2b, inzichten over de diepte van de 1500 mg Cl/l grens ten opzichte van maaiveld. Met FRESHM Zeeland kan de driedimensionale chlorideverdeling van het grondwater in de provincie Zeeland berekend worden. Andere data bronnen die toegevoegde waarde hebben naar het onderzoek van verzilting in Zeeland zijn de kansenkaart kreekruigen en het AHN, Figuur 8c en 8d, waarmee het mogelijk is om de kreekruigen te herkennen in Zeeland, doordat de zandige kreekruigen hoger in het landschap liggen. Kreekruigen zijn ook de locaties waar zich grotere zoetwater bellen bevinden. Om data over grondwater gebruik te vinden kan er gebruik gemaakt worden van de verschillende interactieve kaarten van Waterschap Scheldestromen, zoals de infiltratiesysteem grondwaterbeheer kaart, Figuur 8d.



Figuur 8: a) Qgis kaart van Zeeland geplot met alle EC metingen. b) Grondwaterbeheer Waterschap Scheldestromen, locaties van grondwateronttrekkingen, (<https://scheldestromen.nl/loket/interactieve-kaarten>) c) Kanskaart kreekruigen infiltratiesysteem Kreekrug Infiltratie Systeem (Oude Essink et al., 2018). d) Actueel Hoogtebestand Nederland van Zeeland, van hoog (donkerrood) naar laag (donkerblauw), (<https://www.ahn.nl/ahn-viewer>).

Alle gebruikte data en behaalde resultaten van dit onderzoek zullen worden opgeslagen binnen Deltares. Zo kan een deel van de data worden gebruikt voor het project: slt - Analyse EC metingen Aquality app, om wat sneller inzichten en ideeën te geven over de mogelijkheden voor een of meerdere verdiepende analysis binnen dat project. Naast alle data zullen ook alle gebruikte pythonscripts en gemaakte veldwerkfoto's van dit onderzoek gedeeld worden binnen Deltares en daar ook worden opgeslagen.

4.2 Aquality App python data analyse

De data analyse van de Aquality App is volledig uitgevoerd met behulp van Python in Spyder door gebruik te maken van de Deltaforge Prompt van Deltares. Alle gecreëerde resultaten worden opgeslagen in .csv .shp .png .html op de OneDrive – Stichting Deltares. Met de data analyse kan het eerste onderzoeksdoel beantwoord worden.

Het script begint met het importeren van alle benodigde packages zoals onder andere: numpy, pandas, geopandas, matplotlib en seaborn, het inladen van de data en het inladen van de shapefiles. Het was nog nodig om de shapefiles coördinaten systemen aan te passen naar het coördinaten systeem EPSG:4326. Nadat het inladen van de data voltooid was kon er worden begonnen met de data analyse, beginnend bij het sorteren van de data voor Zeeland en per

regio. En vervolgens is de data verder onderverdeeld in periodes van hydrologische zomer en hydrologische winter voor de periodes van 2021 tot 2024. De eerste metingen zijn begonnen tijdens de hydrologische winter van 2021. Vanuit de gefilterde data per hydrologische zomer en winter is er een statistische analyse uitgevoerd met behulp van `pandas.describe()` en om het te visualiseren zijn er ook boxplots gemaakt, per regio en over tijd met `matplotlib.pyplot` and `seaborn` packages. Vanuit de gefilterde data zijn er een aantal regio's die eruit springen met de hoeveelheid metingen (>500): Schouwen-Duiveland, Walcheren, Zuid-Beveland en Zeeuws-Vlaanderen. Deze data is met behulp van `matplotlib.pyplot` en `scatter_mapbox` geplot op een open-street-map. De manier van plotten zorgt ervoor dat er een interactieve kaart wordt gecreëerd waar de locaties en meetwaarde van de metingen kunnen worden ingezien. Tenslotte zijn er ook nog een aantal hexbin plots gemaakt met `matplotlib` om de hoeveelheid datapunten te visualiseren per hexbin gebied van een regio.

4.3 Veldwerk Zeeland

Op 23 mei 2024 heb ik een veldwerkonderzoek uitgevoerd in Zuid-Beveland, om het tweede onderzoeksdoel te kunnen beantwoorden. Het uitvoeren van veldwerk helpt met begrijpen van een onderzoeksgebied en een gevoel te krijgen voor afstanden tussen de sloten en grootte van de sloten. De doelen van het uitvoeren van de veldmetingen zijn: de meetonzekerheden te identificeren die in de praktijk optreden bij het gebruik van de Aquality App, onderzoeken of er stratificatie optreedt in de sloten, onderzoeken hoe de boer in praktijk omgaat met zijn slootwater en om meer data te verzamelen die kan worden gebruikt voor de verdiepende analyse.

Voor het uitvoeren van de veldmetingen is het belangrijkste wat meegenomen moet worden een EC meter om de zoutconcentratie van het water te kunnen meten. Verder heb je een lange stok of uitschuifbare bezemsteel nodig met aan het uiteinde een open bakje nodig, om zo het water uit de sloot te kunnen scheppen, zie Foto 1 voor hoe ik een meting uitvoer in het veld. De makkelijkste EC meter is de Hanna Dist4 EC meter, omdat de resultaten hiervan makkelijk en snel in de Aquality App gezet kunnen worden met behulp van een telefoon en de sticker voor op de EC meter. Een maatbeker kan gebruikt worden om het slootwater mee op te vangen en zo makkelijker de EC meting uit te voeren. Naast een opgeladen telefoon neem je een plopper mee om de slootdiepte te meten. Tot slot is het essentieel om alle veldobservaties in een veldboekje te noteren, omdat dit helpt om de details van de veldmetingen beter te herinneren wanneer je aan de analyses begint.



Foto 1: Een voorbeeld locatie van waar een EC meting in de sloot uitgevoerd kan worden. In de linkerhand een Hanna Dist4 EC meter en in de rechterhand een lange stok met daaraan een bakje om het water uit de sloot te scheppen.

Voor dit onderzoek is het belangrijk om de handleiding van de Aquality App mee te nemen naar het veld, zodat deze daar getoetst kan worden. Ook is er een vragenlijst over het gebruik van sloten door de boer meegenomen om te onderzoeken hoe de boer in praktijk met zijn slootwater omgaat. Er is van tevoren een plan opgesteld om de EC waarden in verschillende sloten over de gehele breedte (van zuid naar noord) van Zuid-Beveland te meten. Hierdoor kan de verzilting van de zoute Ooster- en Westerschelde bij metingen dichtbij de regiogrenzen, en de verzoeting van het slootwater op het hoger gelegen kreekrug van Zuid-Beveland waargenomen worden.

4.4 Veldwerk Terschelling

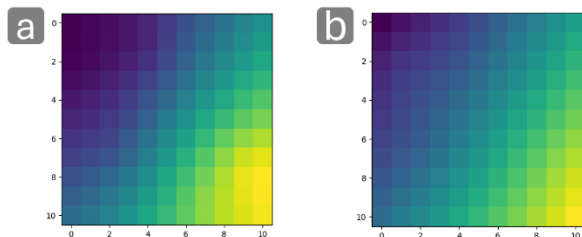
Tijdens het veldwerk op Terschelling, waar net zoals in Zeeland zoute kwel optreedt in sloten, heb ik onderzoek gedaan naar stratificatie in de sloten. In sloten die dieper zijn dan 30 cm is onderzoek gedaan naar stratificatie. Als eerste wordt een oppervlakte meting uitgevoerd. Met behulp van een bakje aan een lange stok wordt water uit de bovenste 5 cm van de sloot geschept, waarbij geprobeerd wordt zoveel mogelijk andere materialen zoals zand en planten te vermijden. Het water wordt vervolgens in een maatbeker gegoten, waarna de EC waarde wordt gemeten met de Hanna Dist4 EC meter. Vervolgens wordt er een diepte meting uitgevoerd door het bakje omgekeerd naar de bodem te brengen met de stok en deze op de bodem pas om te draaien. Zo vult het bakje zich pas op de bodem met water uit de onderste laag. Het bakje wordt dan ook naar boven gehaald en in een lege maatbeker gegoten om zo weer de EC waarde te meten. Wanneer de diepere waarden met meer dan 1.0 mS/cm verschilt van de oppervlakte meting betekent het dat die sloot gestratificeerd is. De diepte van de sloot wordt gemeten met een plopper. Tenslotte wordt de sloot goed gemengd met een stok waarna de EC waarde uit het midden van de sloot gemeten wordt. Verder worden er in de sloten op Terschelling ook raaien gemeten met de methode van EC oppervlaktewater metingen van de Aquality App. Om de continuïteit van de EC metingen bij een raai te waarborgen, wordt er uitsluitend aan de westkant van de weg in de sloot gemeten.

4.5 Verdiepende analyse

Verdiepende analyse wordt uitgevoerd in het gebied Zuid-Beveland met veel metingen gedurende het hele jaar. Met de verdiepende analyse gaat onderzocht worden of het gebruik van interpolatietechnieken meer inzicht geeft van de metingen, het derde onderzoeksdoel. Met interpolatie wordt er aan gebieden met geen waarde een waarde berekend aan de hand van omliggende waarden. De ruimtelijke relatie tussen de waarden wordt bepaald voor een gekozen interpolatie formule. Wanneer de EC metingen worden gesorteerd per maand van Zuid-Beveland is het mogelijk door interpolatie om inzichten van EC, en dus verzilting, te krijgen over ruimte en tijd. Zo kunnen er voorspellingen worden gedaan van de zoutconcentraties in de sloten voor een betreffende maand, wanneer de interpolatie nauwkeurig genoeg is. De interpolatie wordt nauwkeuriger wanneer er wordt geïnterpoleerd op kleiner afvoergebieden en wanneer er rekening wordt gehouden met de stroomgeulkaart.

De gekozen interpolatie techniek is Kriging, omdat deze methode goed kan werken met geografisch gerelateerde data (Oliver & Webster, 1990). The PyKriging packages in python wordt gebruikt voor het interpoleren en de code ondersteunt 2D en 3D Ordinary en Universal Kriging (Murphy, 2014). Ordinary Kriging gebruikt een al bestaande lineaire trend en Universal Kriging gebruikt een trend waarvan de regressie coëfficiënten nog onbekend zijn om de omliggende waarden te berekenen. Het resultaat geeft maar een subtiel verschil en is zichtbaar in Figuur 9a en 9b. De eerste stap is om te kiezen welke celgrootte [m] gebruikt gaat worden voor de

interpolatie en hoe groot de grensafstand van de interpolatie [m] is. Vervolgens wordt het interpolatie oppervlakte bepaalt, er kan gekozen worden uit een rechthoek of een shapefile. Daarna kan er in PyKrige gekozen worden uit zes verschillende modellen die ieder de interpolatie anders uitvoeren, Gaussian, Exponential, Spherical, Linear, Power of Hole-Effect Model. Het resultaat van interpolatie over een rechthoek kan vervolgens worden uitgesneden aan de hand van een gekozen shapefile. Het maakt voor deze manier van interpoleren niet uit voor het resultaat omdat de interpolatie bij een te grote afstand tussen punten de waarden allemaal de gemiddelde EC waarde kregen toegewezen.



Figuur 9: a) Visualisatie van Ordinary Kriging. b) Visualisatie van Universal Kriging. (Benjamin Murphy et al., 2024)

Een voorbeeld van een methode om een waarde aan de nauwkeurigheid van de interpolatie te geven is door gebruik te maken van Monte Carlo simulaties (Zhu & Du, 2016). Met behulp van een python code word 90% van de data van een maand gebruikt om de interpolatie uit te voeren. De overige 10% van de data wordt gebruikt om de interpolatie te valideren. Het script zorgt ervoor dat het 100 keer de validatie uitvoert met voor iedere validatie een andere random gekozen 10% die wordt gebruikt voor de controle. Op deze manier wordt er een nauwkeurigheidswaarde berekend. De nauwkeurigheidswaarde van een interpolatie over een rechthoek zal niet rekening houden met grenzen van zoete en zoute sloten en zal waarschijnlijk minder nauwkeurig zijn in vergelijking met wanneer er wel rekening wordt gehouden met grenzen van zoete en zoute sloten. De invloed van de meetlocatie en hoe deze in de Aquality App wordt weergegeven zal invloed hebben op de nauwkeurigheid van de interpolatie.

Bij het tweede deel van de verdiepende analyse wordt gekeken of er correlaties zichtbaar zijn tussen de EC waarde en kenmerken van de meetlocatie zoals het AHN, FRESHEM diepte van het grensvlak en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen. De FRESHEM 1500 mg Cl/l grensvlak diepte is de diepte waarop zich de grens van agronomisch zoet water naar brak water bevindt ten opzichte van het maaiveld. Het neerslag overschot is de som van de neerslag van de voorafgaande zeven dagen min de verdamping van de voorafgaande zeven dagen. Het doel van de correlaties is om aan te tonen of de zoete en zoute oppervlakte EC metingen ook in relatie staan met de ondergrond en met de gevallen neerslag in de voorafgaande periode. Wanneer je weet waarom het zout is op een plek kun je ook mogelijk maatregelen treffen. De hypothesen zijn dat de metingen met een hoger NAP, lagere EC waarden meten, omdat vooral zoete kreekruigen hoger in het landschap liggen. Waar het grensvlak van de FRESHEM 1500 mg Cl/l grensvlak diepte ten opzichte van maaiveld tussen 0 en 2 meter diepte ligt worden hogere EC waarden gemeten. En bij een negatief neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen zijn de gemeten EC waarden hoger en bij een positief neerslag overschot zijn de EC waarden lager.

5 Resultaten & Discussie

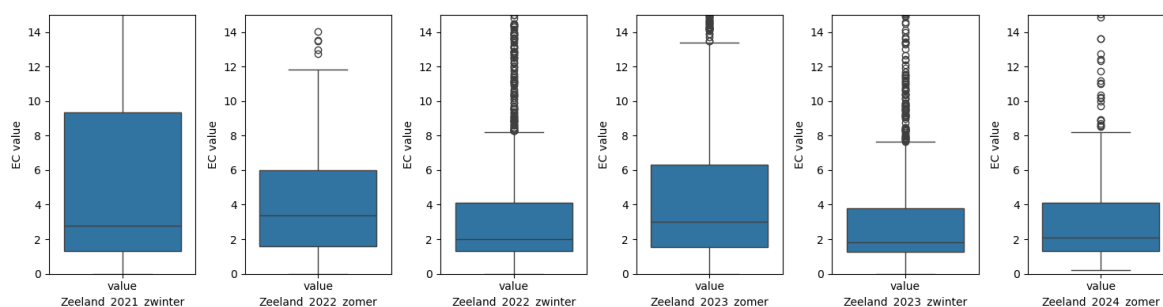
5.1 Aquality App EC data analysis

Het resultaat van de statistische analyse op de EC data is te lezen in Tabel 4. Er zijn al meer dan 5500 EC metingen uitgevoerd met behulp van de Aquality App. Het gemiddelde van de EC waarden ligt op 4.1 mS/cm. Dit wordt gedefinieerd als brak water en is schadelijk voor uien, aardappels en bollenteelt wanneer het wordt gebruikt voor beregening of bodemwater. Gras, tarwe en suikerbieten kunnen ook al schade ondervinden wanneer het wordt berekend met water met een EC van 4.0 mS/cm (Olde, 2022).

Tabel 4: Statistische analyse van de EC data van Zeeland en per regio met het aantal, het gemiddelde, de standaard deviatie, de minimale en maximale gemeten waarde en het 25, 50 en 75 percentiel.

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Zeeland	5255	4	4.5	0	1.3	2.2	4.8	31
Zeeuws-Vlaanderen	2105	3.6	3.6	0	1.4	2.4	4.5	30
Zuid-Beveland	1949	4	4.7	0	1.3	2.1	4.4	30
Walcheren	527	4.4	4.8	0	1.4	2.3	6	31
Noord-Beveland	167	2.4	3	0	1.1	1.5	2.2	20
Tholen	3	2.5	1.6	1.4	1.5	1.7	3	4.3
Schouwen-Duiveland	504	6.1	6.3	0	1.2	3.3	9.7	28
Goeree-Overvlakkee	52	3.4	5.8	0.4	1.1	1.4	1.8	28.6

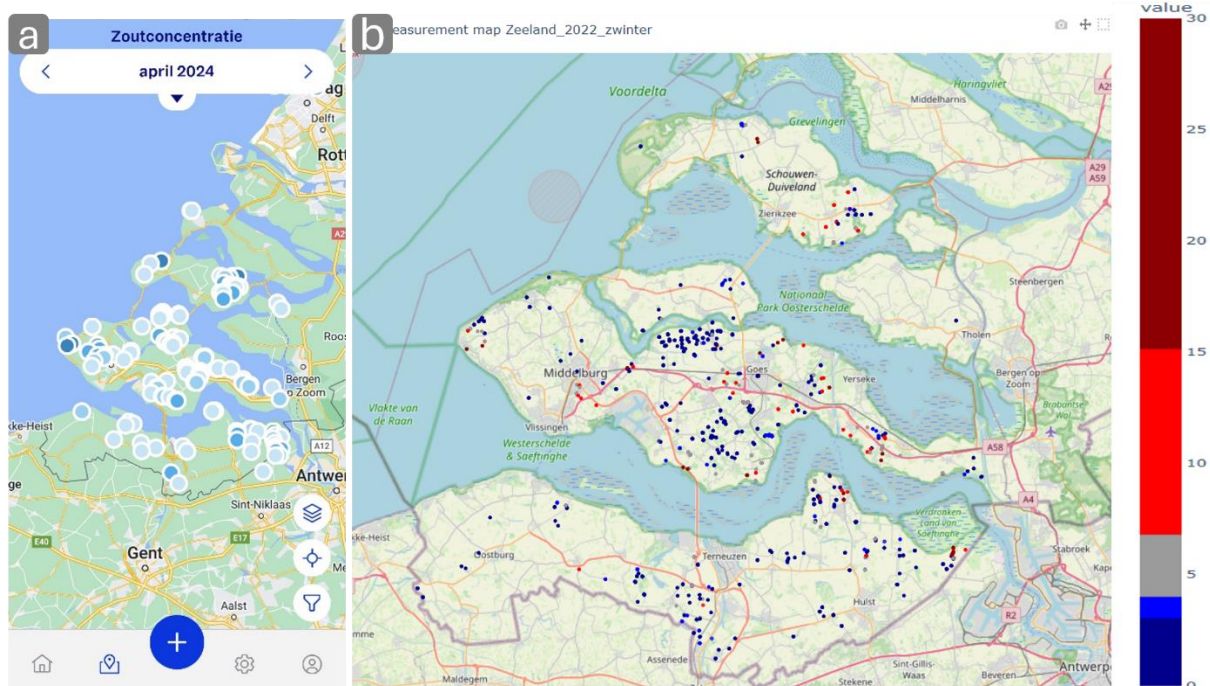
De boxplots van de hydrologische zomer en winter uit de EC gegevens van Zeeland laten een variabel patroon zien. Figuur 10 illustreert deze variabiliteit, te beginnen met een boxplot van de EC waarden uit de hydrologische winter van 2021. Gemiddeld ligt de EC waarde in de hydrologische winter rond de 2.0 EC en in de hydrologische zomer rond de 3.0 EC. De variatie is te verklaren doordat het in de zomer minder vaak regent en meer verdamping optreedt in vergelijking met de winter. Dus dat er minder zoet water aanwezig is in het systeem terwijl de zoute kwelflux het hele jaar constant is.



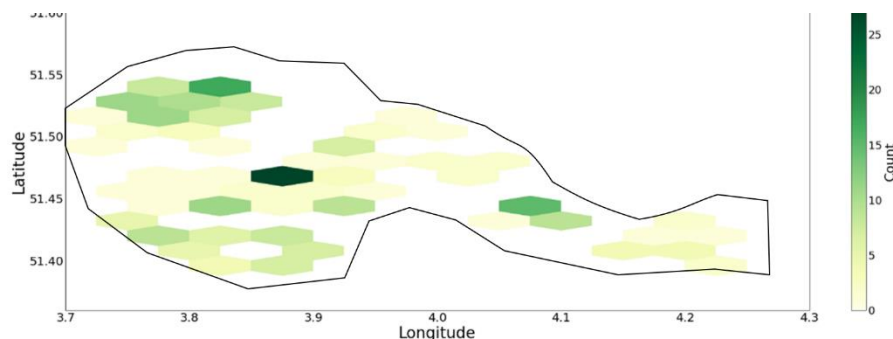
Figuur 10: Boxplots van hydrologische zomer en winter van alle EC metingen van Zeeland.

Naast het uitvoeren van een statistische analyse is het ook goed om de data te plotten om een kaart om inzicht te krijgen in de ruimtelijke verdeling van de metingen. Figuur 11a laat zien hoe de zoutconcentratie metingen worden weergegeven in de Aquality App, met de legenda uit Tabel 1. De data is vervolgens ook geplot op een interactieve kaart met open streetmap, zie Figuur 11b met de metingen van de hydrologische winter 2022 in Zeeland als een voorbeeld. Op de interactieve kaart is de weergavegrootte van de punten verkleint en de legenda aangepast naar die van Tabel 2. Om ook inzicht te krijgen naar de hoeveelheid metingen die zijn verricht

in kleinere gebieden is een Hexbin plot gemaakt. De plot geeft het aantal metingen per gebiedje weer, zie Figuur 12 voor de Hexbin plot van de metingen van maart 2022 op Zuid-Beveland. Deze twee manieren van plotten helpen met inzichten creëren in de data en kunnen gebruikt worden voor een verdiepende analyse in een gebied.



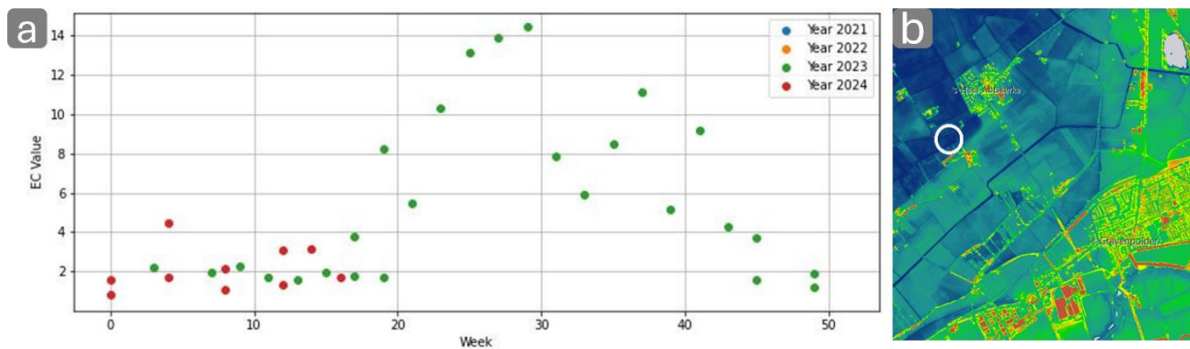
Figuur 11: a) Schermafdrak van de zoutconcentratie metingen in April 2024 van de AQUALITY App. b) Een interactieve plot op open streetmap van oppervlaktewater metingen van de hydrologische winter 2022 in Zeeland, voor de legenda zie Tabel 2.



Figuur 12: Een weergave (Hexbin plot) van de hoeveelheid oppervlaktewater metingen van maart 2022 van Zuid-Beveland per hexbin.

5.1.1 Tijdsserie EC metingen

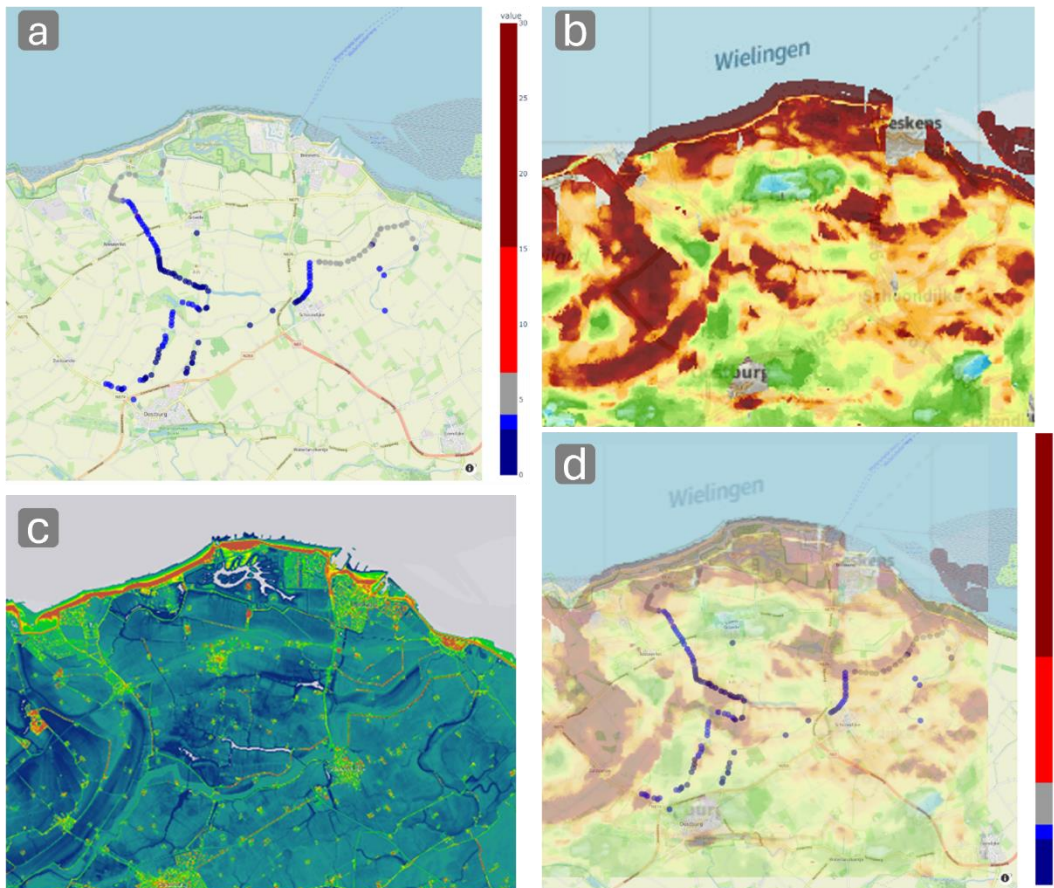
Er is een grote cluster (>20 metingen) van EC metingen rond het perceel van een boer in de buurt van 's-Gravenpolder, Figuur 13b. De tijdsserie van de metingen is begonnen in januari 2023 en wordt tot het heden bijgehouden. In de tijdsserie is er een duidelijk verschil zichtbaar tussen de winter waar de EC gemiddeld rond de 2.0 mS/cm ligt en in de zomer oploopt tot 14.0 mS/cm, zie ook Figuur 13a. Een verklaring voor de zomerse verhoging van de zoutconcentratie in de sloot kan worden gegeven aan de hand van het conceptuele model over de relatie tussen hydrologie en waterkwaliteit in bodem-, grond- en oppervlaktewater van (Rozemeijer & Broers, 2007, Figuur 3). Dieper gelegen sloten kunnen verzilten door zoute kwel tijdens een droge zomer, wanneer de grondwaterstand lager is en er geen verbinding is met andere sloten die mogelijk zoetwater kunnen aanvoeren. Het AHN, zoals weergegeven in Figuur 13b, toont aan dat de gemeten sloot inderdaad diep gelegen is en daardoor onderhevig aan zoute kwel.



Figuur 13: a) Een datacluster bevindt zich in de buurt van 's-Gravenpolder in Zuid-Beveland en bevat een tijdserie van EC waarde vanaf januari 2023 weergegeven met het weeknummer van de EC meting. b) AHN kaart met in wit aangegeven waar de EC data cluster zich bevindt in de buurt van 's-Gravenpolder in Zuid-Beveland

5.1.2 Verziltingsgradiënt Zeeuws-Vlaanderen

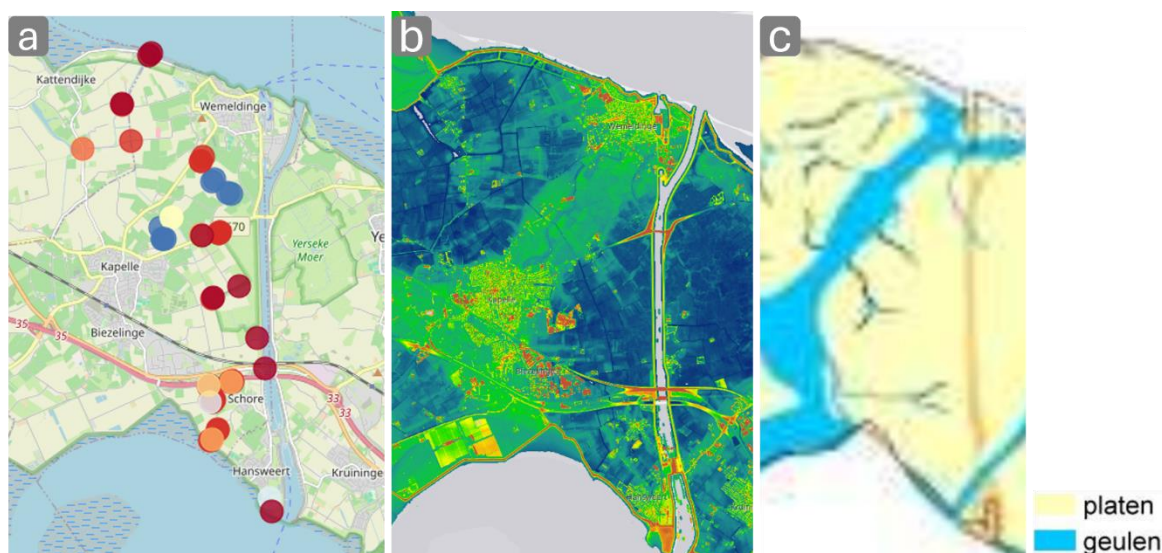
Er zijn veel veldmetingen uitgevoerd op dezelfde dag door schoolkinderen in Zeeuws-Vlaanderen, zie Figuur 14a. De gemeten waarde in de oppervlakte sloten laten een verziltingsgradiënt zien van brak in de buurt van de Westerschelde naar zoeter verder landinwaarts van de Westerschelde. Het spatiele verziltingsgradiënt correleert met de kaarten van FRESHEM en het AHN van dit gebied, Figuur 14b en 14c. De FRESHEM kaart laat de diepte van de grens van 1500 mg Cl/l zien, dicht bij de Westerschelde komt die grens aan het oppervlakte, dat verklaart waarom de oppervlakte sloten in die regio ook hogere EC waarde tonen. Op grotere afstand van de Westerschelde ligt de FRESHEM grens ook dieper, waardoor de zoute kwel eigenlijk geen invloed meer heeft op het oppervlaktewater. De metingen zijn uitgevoerd in september 2023. De diepte van de 1500 mg Cl/l grens is grotendeels ook te verklaren aan de hand van de AHN kaart van het gebied. De locaties waar de grens van 1500 mg Cl/l dicht bij het oppervlak komt, bevinden zich in de laagste delen van het gebied en staan daardoor meer in verbinding met de zoute kwelstromen in Zeeland. Om te verduidelijken waar de metingen zijn verricht op de FRESHEM kaart, zijn de kaarten over elkaar gelegd, zoals weergegeven in Figuur 14d. Dit toont aan dat de gemeten oppervlaktewaarden overeenkomen met de dieptemetingen van FRESHEM.



Figuur 14: a) Locaties van de EC metingen door scholieren op Zeeuws-Vlaanderen geplot op de open streetmap, legenda zie Tabel 2. b) De FRESHM kaart laat is ingezoomd op het deel van Zeeuws-Vlaanderen waar de metingen zijn verricht en laat de diepte van de grens van 1500 mg Cl/l 'landbouwkundig zoet' zien, waar de legenda gaat van: het oppervlakte (donkerrood) tot >20 m diepte (blauw). c) Het Actueel Hoogtebestand Nederland ingezoomd op het deel van Zeeuws-Vlaanderen waar de metingen zijn verricht, van hoog (donkerrood) naar laag (donkerblauw). d) Transparante FRESHM kaart bovenop de EC metingen kaart.

5.2 Veldwerk Zeeland - Aquality App

Op 23 mei 2024 heb ik veldwerk uitgevoerd op Zuid-Beveland om inzichten te krijgen over afstanden tussen sloten, slootgrootte, slootdiepte, vegetatie en hoogte van het landschap in Zeeland, om ervaring op te doen in het verrichten van metingen voor de Aquality App en de bijbehorende handleiding te toetsen. Het resultaat van de EC metingen in Zuid-Beveland zijn zichtbaar in Figuur 15a. Er zijn veel EC metingen in dit gebied van Zuid-Beveland boven de 20 mS/cm, maar ook een aantal erg zoete metingen. Een verklaring voor het verschil in metingen kan worden gevonden met de AHN en kreekruigen kaart van dit gebied. De meetlocaties met de bijbehorende waarden zijn te correleren aan deze kaarten, die ook zichtbaar zijn in Figuur 15b en 15c. De hooggelegen zandige kreekrug die door Zuid-Beveland loopt, slaat veel zoet regenwater op door de hoge porositeit en permeabiliteit. Dit zoete grondwater verzamelt zich ook in de sloten aan het oppervlak, wat vervolgens met de EC meter is gemeten. De lager gelegen omliggende poelgronden in dit gebied ondervinden echter meer zoute kwelflux, wat ook veelal is gemeten tijdens het veldwerk in de oppervlaktewateren van de sloten. Verder helpt het veldwerk bij het verkrijgen van meer data dat gebruikt kan worden voor de verdiepende analyses.



Figuur 15: a) De resultaten van het veldonderzoek in Zuid-Beveland. Van zout >15.0 mS/cm (donkerrood) naar zoet < 2.0 mS/cm (donkerblauw), zie ook de legenda in Tabel 5. B) AHN kaart van veldwerkgebied in Zuid-Beveland, van hoog (donkerrood) naar laag (donkerblauw). c) Kreekruggenkaart van veldwerkgebied in Zuid-Beveland, waar de oude geulen nu de hooggelegen kreekruggen zijn en de platen de laaggelegen poelgronden in het gebied.

Tabel 5: Legenda Aquality App web interface van zoet (blauw) tot zout (rood).

EC [mS/cm]	Cl [g/l]	Benaming	Kleur
>15.0	>5.0	Zout	Donkerrood
4.0 – 15.0	1.33-5.0	Brak	Rood
2.0 – 4.0	0.67-1.33	Licht brak	Licht blauw
<2.0	<0.67	Zoet	Blauw

Tijdens het veldwerk is er ook onderzoek gedaan naar het watergebruik van de boeren in de omgeving. Er zijn twee boeren gesproken die in de omgeving aan het werk waren. De eerste boer is de verzorger van de kwaliteit van het gras op een golfbaan in Tholen. Hij zei: “De maximale EC waarde van het water dat gebruikt kan worden voor beregening van het gras op de golfbaan is 2.5 mS/cm”. De grenswaarde ligt nog 1 mS/cm lager dan in (Olde, 2022), dat is omdat het gras op de golfbaan van hoge kwaliteit moet zijn. Verder zei he: “Het water wat wordt gebruikt voor beregening in Tholen is voornamelijk afkomstig van zoete watergeul (kil) welke zijn oorsprong van zoet water uit de Brabantse wal heeft. Veel boeren nemen zoet water uit deze sloot en dumpen het zoutere afvoerwater in andere oppervlakte sloten om ervoor te zorgen dat de zoete watergeul zoet blijft”. De tweede boer was bezig met een controle op zijn akkerland waar uien aan het groeien waren. De boer vertelde: “Wij gebruiken eigenlijk geen slootwater voor de beregening van het land, vaak is de regen die valt al voldoende.” Verder gaf hij aan dat ze bij extreme droogte wel slootwater gebruiken, maar dat de EC waarde van het water in dat geval niet wordt gemeten. Voor de boer is het belangrijkste het water zelf en de zoutconcentratie is daarbij minder relevant. Echter laat Olde (2022) weten dat er al schade optreedt bij de beregening met een EC > 0.5 mS/cm bij uien. Aan de hand van deze twee gesprekken kunnen een aantal conclusie worden gehaald. Ten eerste heeft zoutgehalte van het slootwater een negatief effect op de verschillende gewassen van de boeren, alleen is niet iedere boer daar even bewust mee bezig. Ten tweede blijkt dat nog niet alle boeren de zout concentratie (of waterkwaliteit) van de sloten meten. Het is belangrijk om goed met elkaar te communiceren en de EC metingen voort te zetten om de verzilting in kaart te brengen en een uitgebreide dataset op te bouwen. Het bewustzijn bij de boeren over de huidige en toekomstige verzilting moet

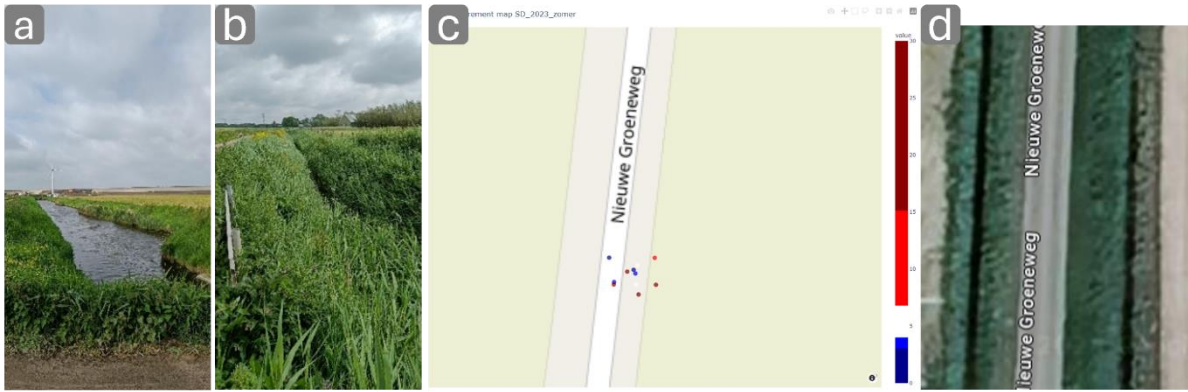
worden vergroot omdat de verzilting in de toekomst zal blijven toenemen door factoren zoals bodemdaling en relatieve zeespiegelstijging in Zeeland en er hierdoor meer schade zal ontstaan aan de akkergrond.

Na het veldwerk op Schouwen-Duiveland, waar prikstokmetingen zijn uitgevoerd op het land van Den Boer, heb ik ook onderzocht hoe groot de correlatie is tussen het drainwater uit de twee drainageputten op verschillende diepten en het oppervlaktewater. Hierbij zijn er EC metingen met temperatuur uitgevoerd in de ondiepe drainage put (80 cm diep), diepe drainage put (120 cm diep) en het oppervlakte water naast de putten, zie Tabel 6 voor de gemeten waarden. De temperatuur van het oppervlaktewater komt overeen met het drainwater van de ondiepe put. Hierdoor lijkt het oppervlaktewater meer in verbinding te staan met de ondiepe drainageput. Alleen de EC meting van het oppervlaktewater (1.62 mS/cm) ligt tussen de EC waarden van de ondiepe drainageput (0.74 mS/cm) en diepe drainageput (2.86 mS/cm) in, wat suggereert dat ze niet heel erg in verbinding staan. Naast de toevoer van het drainwater uit de putten van Den Boer wordt de EC waarschijnlijk ook nog beïnvloed door andere drainage afvoer van omliggende percelen en door zoute kwel, aangezien de akker relatief laag in het landschap ligt volgens het AHN. Er is dus hier geen directe relatie gevonden tussen de EC van het drainwater en de EC van de sloot direct ernaast.

Tabel 6: EC metingen uitgevoerd op het land van Den Boer in de ondiepe drainageput, diepe drainage put en het oppervlaktewater naast de putten.

Monstertype Den Boer	EC [mS/cm]	Temperatuur [°C]
Drainwater 80 cm (ondiepe put voor)	0,74	14,6
Drainwater 120 cm (diepe put achter)	2.86	13.5
Oppervlaktewater (sloot naast putten)	1,62	14,6

Tijdens het veldwerk is de handleiding van de Aquality App getoetst om te kijken waar eventuele aanpassingen of verbeterpunten zijn. Er zijn een aantal dingen opgevallen die mogelijk aangepast kunnen worden om zo betere meetresultaten te krijgen. Zo staat er goed in de handleiding dat er een watermonster genomen moet worden uit de sloot met zo weinig mogelijk modder, planten en beestjes uit de sloot. Alleen staat er niet uitgelegd op welke manier dat het beste gedaan wordt. Dat is wel belangrijk, omdat het water in de sloot niet altijd even bereikbaar is, een voorbeeld van een moeilijk te meten sloot is zichtbaar in Figuur 16b. Naast dat de meting van de Hanna Dist4 EC meter met een telefoon gescand kan worden in de Aquality App zou het goed zijn als er ook een foto van de sloot waarin de meting is uitgevoerd kan worden gescand. De staat van de sloot kan namelijk heel verschillend zijn, zie Figuur 16a en 16b, en door een foto te maken, kan later de slootconditie van de sloot opnieuw bekeken worden. Dit kan helpen met de inzichten voor mensen die de EC waarde van de sloot niet zelf hebben gemeten. Wanneer ook een dieptemeting wordt toegevoegd in de Aquality App ontstaat er ook meer inzicht in hoeveel water er betrouwbaar in de sloot aanwezig is. Eventueel kan ook een meetsysteem in de sloten aangebracht worden die de waterhoogtes automatisch meten. Tegenwoordig is het mogelijk om de locatie van de EC meting in de telefoon te verslepen naar de locatie van de sloot waar de EC meting werkelijk is verricht. Het is belangrijk om op te schrijven in de handleiding dat het ook altijd de bedoeling is. Op dit moment zijn veel waarden van de Aquality App nog gekoppeld aan de coördinaten op de weg, waar de meting uit de sloot dan wordt verwerkt op de telefoon, zie Figuur 16c. Alleen zijn er vaak aan beide kanten van de weg sloten en zo is het onduidelijk in welke sloot de meting is verricht, zie Figuur 16d. Dit maakt het lastig voor de analyse van de metingen achteraf. De sloten staan vaak niet in verbinding met elkaar en kunnen beide een andere zoutgehalte concentratie hebben.



Figuur 16: a) Data punten geprojecteerd op de kaart in de Aquality App. b) Er bevinden aan beide kanten van de weg sloten. c) Een foto van een brede diepe sloot met weinig vegetatie aan de randen. d) Een foto van een smallere ondiepe sloot met veel vegetatie aan de randen.

Het uitvoeren van een meting met de Aquality App is snel en eenvoudig, daardoor is het mogelijk om veel metingen tegelijkertijd in een gebied uit te voeren, waardoor een uitgebreide database wordt opgebouwd die waardevolle inzichten kan bieden. Dit is het belangrijkste en grootste voordeel van de Aquality App. Echter, er is geen controle over de uitgevoerde EC metingen, wat leidt tot onzekerheid in de data. Bovendien worden de metingen niet consistent uitgevoerd, bijvoorbeeld elke eerste dag van de maand. Dit maakt het moeilijker om hoogwaardig wetenschappelijk onderzoek te doen met de gegevens van de Aquality App.

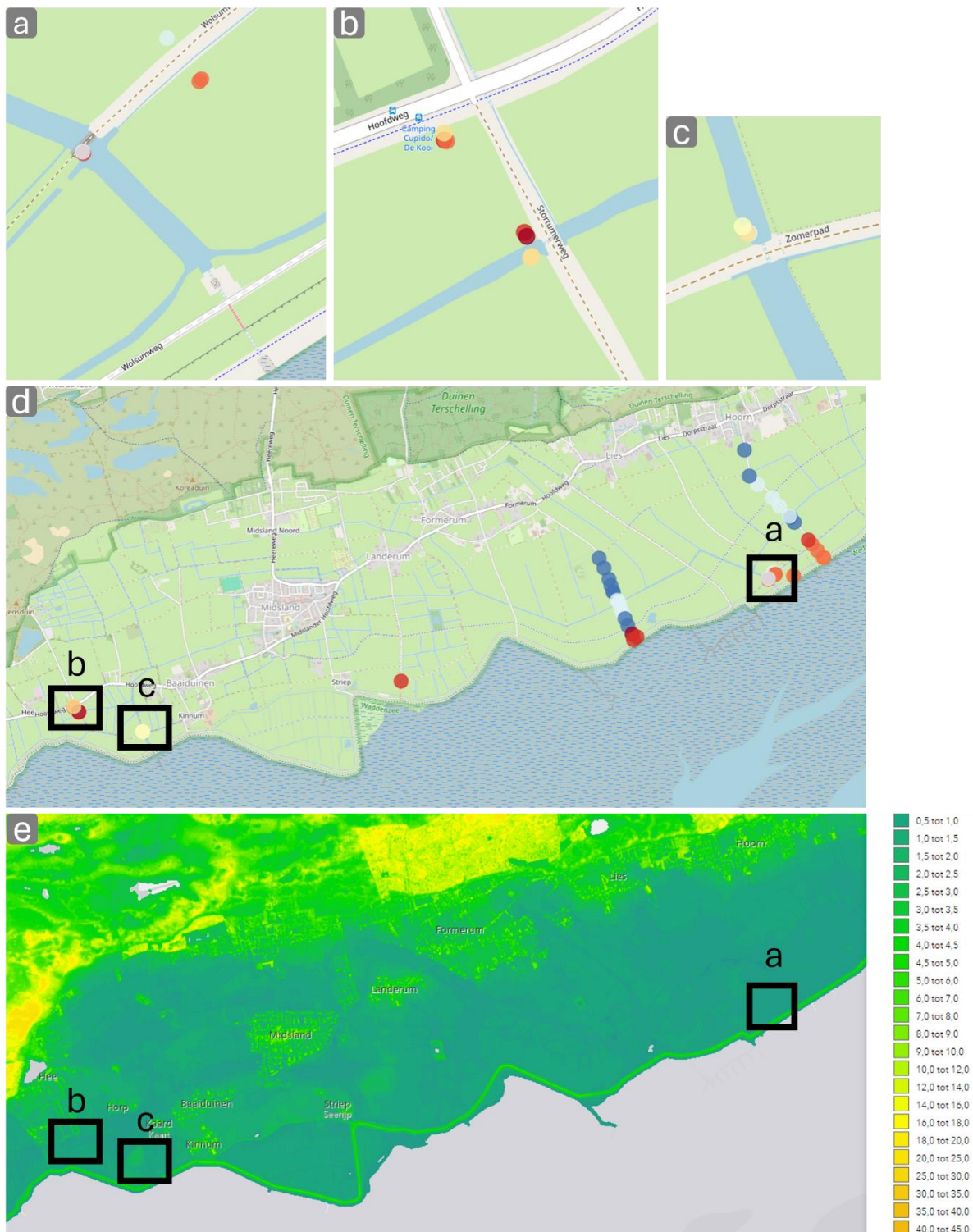
Tot nu toe is het nog niet heel praktisch om een EC meting uit te voeren tijdens alledaagse activiteiten, zoals het uitlaten van de hond of een rondje fietsen, omdat naast de EC meter ook een bakje meegenomen moet worden en vaak het water ook met een lange stok uit de sloot gehaald moet worden. Voor in de toekomst kan er binnen Deltares nagedacht worden aan een product wat in een klein meeneem tasje past en wel makkelijk een meting mee uit te voeren is. Dit product kan vervolgens meegegeven, of verkocht, worden aan geïnteresseerde. Dan kan het bestaan uit een uitschuifbare stok waar een bakje aan vastzit en ook de Hanna Dist4 EC meter in bewaard kan worden.

5.3 Veldwerk Terschelling – Stratificatie & Verziltingsgradiënt

Het was gelukt om de mogelijke stratificatie in sloten door zoute kweldruk te onderzoeken in drie gebieden tijdens het veldwerk op Terschelling van 8 tot 10 juli 2024. De drie gebieden waar stratificatie onderzoek is uitgevoerd, a, b en c, zijn zichtbaar in Figuur 17d en de bijbehorende legenda van de EC metingen is zichtbaar in Tabel 5.

In het gebied van Figuur 17a zijn eerst de EC waarden van de noordelijke en zuidelijke sloot naast de weg gemeten. De EC waarden verschillen behoorlijk tussen beide sloten. De noordelijke sloot naast de weg met geen stroming is een licht brakke ondiepe sloot met een EC waarde van 3.21 mS/cm. De zuidelijke sloot naast de weg met stroming is een brakke diepe sloot met aan het oppervlakte een EC waarde van 8.11 mS/cm en op 60 cm diepte een EC waarde van 8.31 mS/cm. De zuidelijke sloot is brak doordat deze sloot wordt gevuld door water van het eerste zoute perceel achter de Waddenzeedijk en de sloot is waarschijnlijk niet gestratificeerd door de stroming die er in staat. Beide sloten wateren af op de 100 cm diepe hoofdgeul uitkomend bij een gemaal naar de Waddenzee. De EC waarden op deze locatie in de niet stromende hoofdgeul zijn: aan het oppervlakte, 3.52 mS/cm; op 50 cm diepte, 3.71 mS/cm en op 100 cm diepte, 13.65 mS/cm. De stilstaande hoofdgeul vertoont duidelijke stratificatie. Aan het oppervlak is het water nog licht brak, vergelijkbaar met de noordelijke sloot, terwijl het

water op diepte veel zouter is, zelfs zoutiger dan in de zuidelijke sloot. Dit kan waarschijnlijk worden verklaard door extra kweldruk vanuit de bodem, aangezien de sloot zich in de nabijheid van de zoute Waddenzee bevindt.



Figuur 17: a) Stratificatie EC metingen van een brug bij een gemaal op Terschelling, legenda is Tabel 5. b) Stratificatie EC metingen in de polder op Terschelling, legenda is Tabel 5. c) Stratificatie EC metingen bij peilbuis op Terschelling, legenda is Tabel 5. d) Overzichtskaart met de drie gebieden waar stratificatie onderzoek is uitgevoerd. E) AHN kaart (statische opmaak) met de drie gebieden waar stratificatie onderzoek is uitgevoerd.

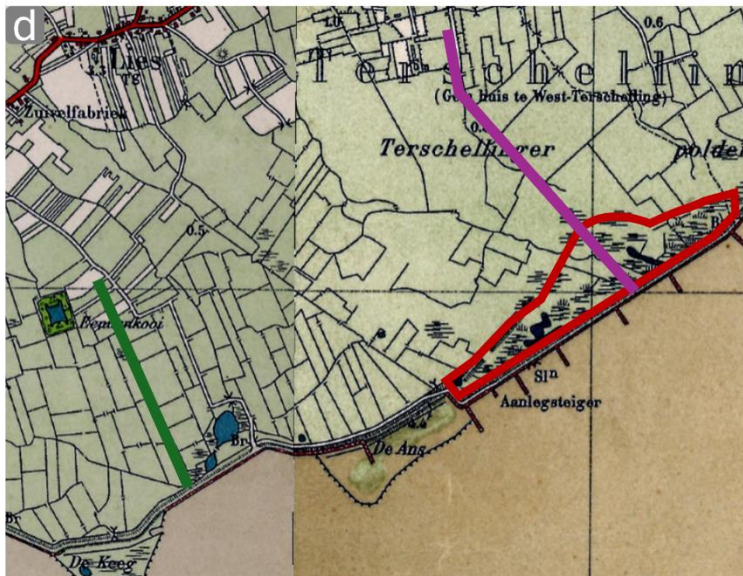
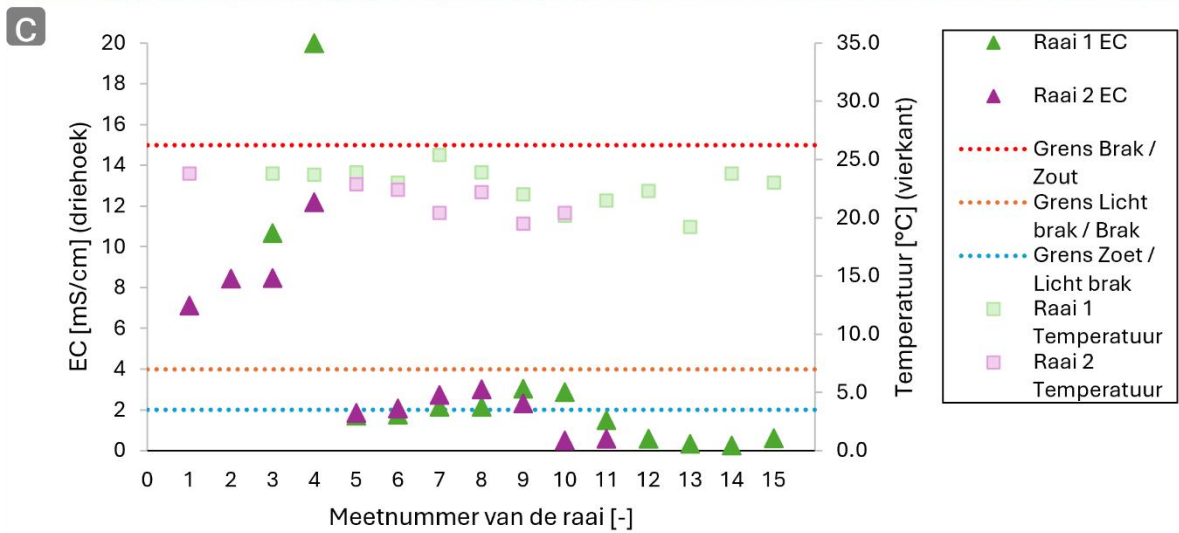
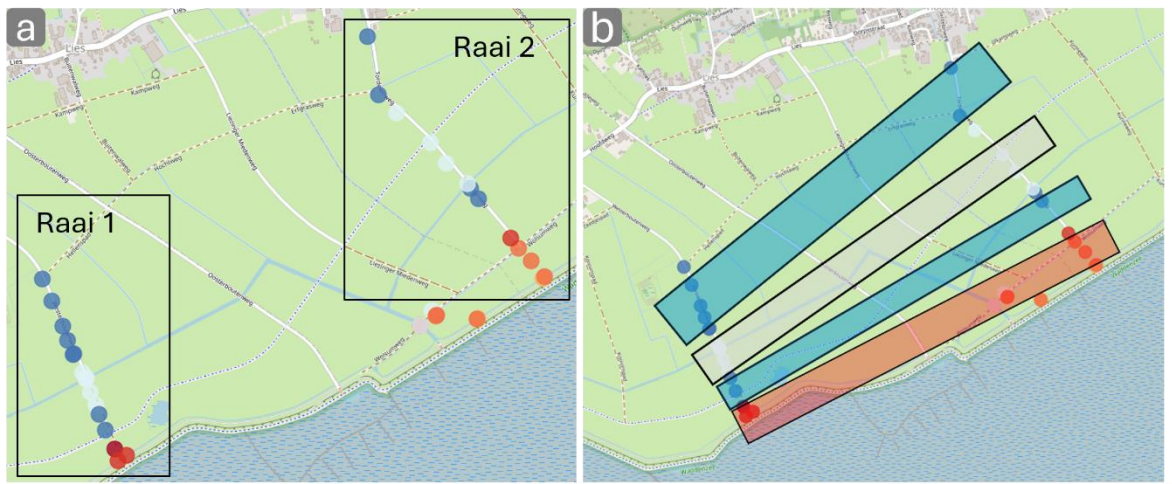
Verder landwaarts is stratificatie gemeten in twee kleinere stilstaande sloten. De hoofdgeul is hier niet gestratificeerd, zie Figuur 17b. In de kleine stilstaande sloot vlakbij de bushalte, Figuur 17b, is getest wat voor invloed het mengen van de sloot heeft op het meten van de zoutconcentratie. De meting van het water in de bovenste 5 cm is 5.56 mS/cm. Op 55 cm diepte is de EC waarde gestegen naar 11.68 mS/cm, de sloot is gestratificeerd. Vervolgens is de sloot goed gemengd en is een meting vanuit het midden verricht, wat een waarde van 9.53 mS/cm opleverde. Dit toont aan dat het zoutgehalte aanzienlijk kan variëren, afhankelijk van de meetdiepte en de conditie van de sloot. Het water aan het oppervlak van de kleinere, stilstaande sloot nabij het gemaal, die aansluit op de hoofdafvoergeul, heeft een EC waarde van 11.81 mS/cm. Op een diepte van 80 cm bedraagt de EC waarde 29.0 mS/cm. Dit duidt op een aanzienlijke zoute kwel, die de sloot stratificeert. De hoofdafvoergeul aan de andere kant van het gemaal is niet zo zout en heeft een EC waarde van 5.94 mS/cm aan het oppervlakte en van 5.97 mS/cm op 100 cm diepte. Door de stroming en de invloed van de wind is de hoofdafvoergeul niet gestratificeerd. Op nog een andere locatie, Figuur 17c, is getest wat de invloed het mengen van de sloot is op de gemeten zoutconcentratie. Aan het oppervlak van de stilstaande hoofdgeul is de EC 3.73 mS/cm. Op een diepte van 118 cm bedraagt de EC 5.17 mS/cm. Wanneer de hoofdgeul goed is gemengd voordat een meting wordt uitgevoerd, bedraagt de EC 4.41 mS/cm.

De gebieden waar stratificatie is waargenomen, vertonen geen stroming in de sloot en bevinden zich in laaggelegen gebieden met hoge zoute kweldruk. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 17e, die de meetlocaties in combinatie met de AHN-kaart toont. Dit bevestigt dat de diepte van de meting en de conditie van de sloot een aanzienlijke invloed hebben op de gemeten EC waarde. Bij de introductie van de Aquality App op Terschelling werd aangegeven dat de sloot eerst goed gemengd moest worden voordat een meting werd verricht. Aangezien deze informatie niet in de Aquality App is opgenomen, introduceert dit onzekerheid in de gemeten EC waarden. Het is essentieel om de meetmethoden en slootconditie duidelijk te beschrijven in de handleiding van de Aquality App. Deze aanbevelingen zijn te vinden onder: Aanbevelingen voor de handleiding van de Aquality App.

De resultaten van twee raaien van EC oppervlaktewater metingen in de sloten op Terschelling met de Aquality App op 8 en 9 juli 2024 zijn te zien in Figuur 18a, met Tabel 5 als bijbehorende legenda. In beide profielen zijn dezelfde en duidelijke overgangen te zien. Zo zijn de EC metingen in de sloten parallel aan de Waddenzeedijk erg zout. De eerste sloot aan de zuidwestkant naast de weg, die eindigt voor de dijk, is extreem zout. Iets verder landinwaarts gekeken vindt er een erg grote overgang plaats naar zoet slootwater aan de zuidwestkant van de weg. Bij en in de bredere hoofdafvoergeul van Terschelling is er een overgang naar licht brak slootwater. Nog verder richting de duinen aan de Noordzee wordt het slootwater aan de zuidwestkant van de weg weer steeds zoeter. Aangezien beide raaien dezelfde stratificatie gradiënt laten zien, Figuur 18c, is ook een bredere ruimtelijke visualisatie van de zoutconcentratie in oppervlaktewater op basis van de verwachte EC waarde gemaakt, zie Figuur 18b. De hoge zoutconcentraties net achter de dijk zijn te verklaren door de zoute kwelstroom onder de Waddenzeedijk. De meerdere zoute metingen bij raai 2 zijn te verklaren aan de hand van topotijdreis kaart van Terschelling, Figuur 18d. Voor dit gebied werd ingepolderd rond 1950 was het nog een gebied met zoute dras en riet bodem. Tegenwoordig vind daar nu nog steeds veel zoute kwel plaats wat de hoge zoutconcentraties in het oppervlakte water verklaard. Verder landinwaarts zijn de oppervlakte sloten zoet, mogelijk door de vele regenval dit jaar. De hoofdgeul heeft brakke EC waarden, omdat dit een gemiddelde is van alle zoete en zoute sloten en heeft ook meer te maken met zoute kwel aangezien de

hoofdgeul ook wat dieper ligt in het landschap ten opzichte van de andere sloten, zie Figuur 17e.

De resultaten van deze EC oppervlakte water metingen kunnen in de toekomst vergeleken worden met de resultaten van de DUALEM metingen die langs dezelfde weg zijn uitgevoerd tijdens het Terschelling veldwerk. De DUELEM meet de elektrische geleidbaarheid van de bodem aan de hand van elektromagnetische golven tot diepten van ~6 meter. De verwachting is dat de meest ondiepe waarden van de DUELEM overeenkomen met de EC oppervlaktewatermetingen, en dat de locatie van de grensovergang van brak/zout naar zoet nauwkeuriger kan worden bepaald met de resultaten van DUELEM. Dit komt doordat de DUELEM elke seconde één meting uitvoerde tijdens het lopen van de raaien.

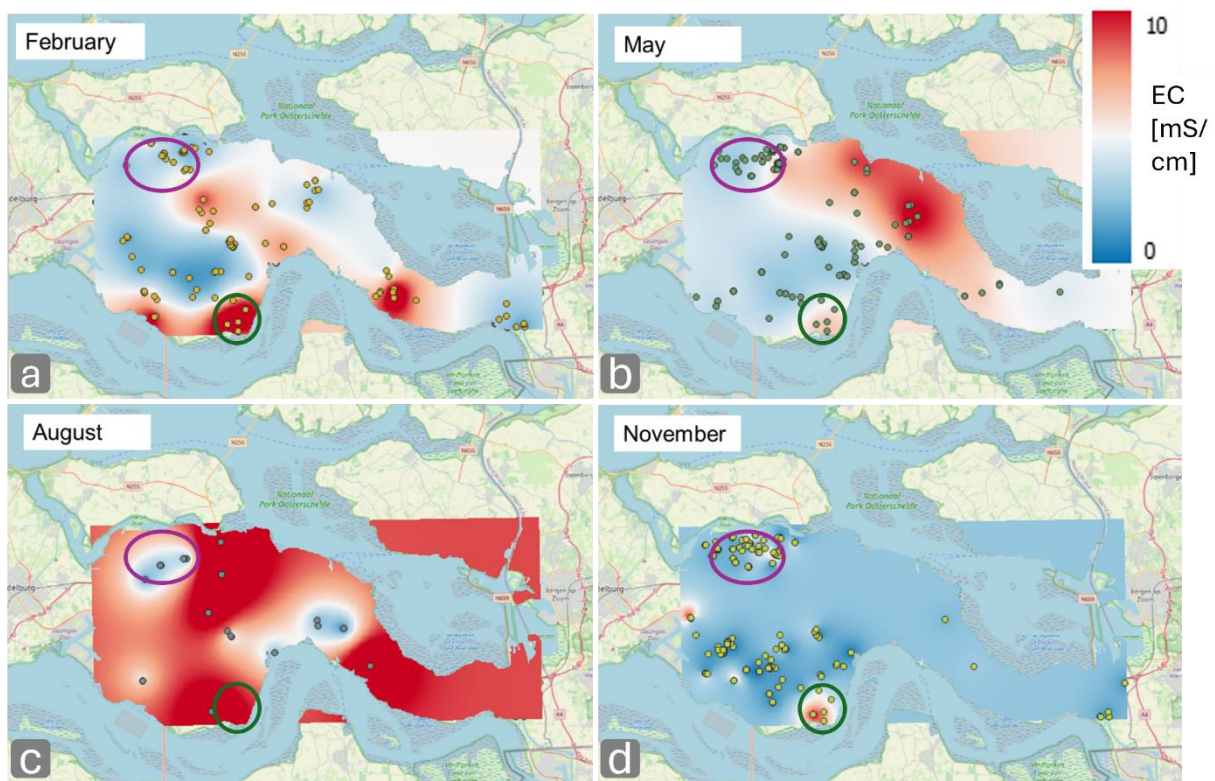


Figuur 18: a) Twee raaien gemeten van EC oppervlaktewater metingen in de sloten, gemeten in de polders vanaf de Waddenzeedijk landinwaarts richting de duinen van de Noordzee, legenda is zichtbaar in Tabel 5. b) Verwachte EC waarden van oppervlakte water tussen de twee raaien die beide hetzelfde verzilting gradiënt meten, legenda is zichtbaar in Tabel 5. c) Een spreidingsdiagram van de twee raaien met bijbehorende temperatuur metingen naast elkaar van de Waddenzeedijk [0] naar de duinen van de Noordzee [15]. d) Oude landkaart Terschelling met raai 1 (groen), raai 2 (paars) en meest recente inpoldering van zoute dras en riet bodem (rood). (<https://www.topotijdreis.nl/kaart/1951/@151891,599751,10.25>)

5.4 Verdiepende Analyse

5.4.1 Interpolatie EC over tijd en ruimte

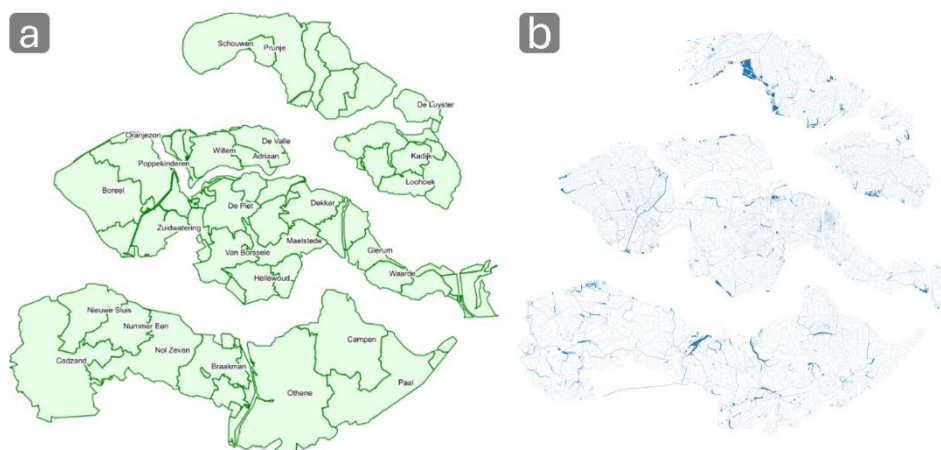
Uit de data analyse kwamen de volgende regio's naar voren met veel (>500) EC metingen, waarop een verdiepende analyse op uitgevoerd kan worden: Zeeuws-Vlaanderen, Zuid-Beveland, Schouwen-Duiveland en Walcheren. Met de data van Zuid-Beveland is getest of interpolatie met Ordinary Kriging een handige methode is om EC gegevens te visualiseren en zo meer inzicht te krijgen in verzilting in Zeeland, omdat dit gebied de hoogste meetdichtheid heeft (6.02 EC metingen per km²) en in iedere maand minstens 30 metingen (>0.09 EC metingen per km² per maand). Met behulp van het python pakket PyKrige en Ordinary Kriging zijn de oppervlaktewater EC metingen van Zuid-Beveland per maand geïnterpoleerd. De interpolatie wordt uitgevoerd over een rechthoek waarin alle datapunten zich bevinden en na de interpolatie uitgesneden op de landgrenzen van Zuid-Beveland. De interpolatie is uitgevoerd voor iedere maand, alleen de resulteren kaarten van de maanden februari, mei, augustus en november zijn weergegeven in Figuur 19. Het resultaat van de interpolatie laat goed het verschil zien tussen de zoete winter en de zoute zomer. Bij Scheldeoord (groene cirkel, midden onder op de kaart) op Zuid-Beveland worden door het gehele jaar zoute metingen verricht, dit zou een goede indicatie zijn voor een locatie van zoute kwel. En bij de Veerse Meer (paarse cirkel, links boven op de kaart) op Zuid-Beveland worden door het gehele jaar juist zoete metingen verricht, wat een indicatie is voor een grote kreekrug in het landschap. Deze resultaten kunnen ook worden verklaard door te kijken naar het AHN en de kanskaart kreekruigen infiltratiesysteem kaart van dit gebied, Figuur 8b en 8c.



Figuur 19: Interpolatie met behulp van Ordinary Kriging van de EC data in Zuid-Beveland. De legenda gaat van een EC in mS/cm van zoet 1.0 (blauw) naar zout 10.0 (rood). a) Alle datapunten uit de maand februari met bijbehorende interpolatie. b) Alle datapunten uit de maand mei met bijbehorende interpolatie. c) Alle datapunten uit de maand Augustus met bijbehorende interpolatie. d) Alle datapunten uit de maand november met bijbehorende interpolatie.

Het betreft een eerste, eenvoudige interpolatie van de EC metingen die nog geen rekening houdt met de afwateringsgebieden of de waterwegen- en rivierenkaart van Zuid-Beveland,

omdat dit complexer is en momenteel te veel tijd zou vergen. Verbeteringen in de interpolatie zijn noodzakelijk voor de oppervlaktemetingen, aangezien de waterwegen niet altijd met elkaar verbonden zijn en er op korte afstand aanzienlijke verschillen in EC waarden kunnen optreden, doordat het oppervlakte water ook een connectie heeft met het bovenste grondwater. Deze proxydata zijn essentieel om verdere vooruitgang te boeken. Daarnaast kan het onderzoeksgebied ook eerst uitgesneden worden voordat de interpolatie begint, in plaats van achteraf en zou proxy data zoals dat de Ooster- en Westerschelde altijd zout is meegenomen kunnen worden. De interpolatie kan ook op een kleinere schaal worden uitgevoerd waar meer metingen zijn, want nu zijn er gebieden waar de betrouwbaarheid erg laag is omdat er geen metingen zijn verricht. In plaats van over de hele regio kan de interpolatie ook op de schaal van de afwateringsgebieden worden toegepast, of zelfs op de schaalgrootte van de waterwegen kaart van Zeeland, zie Figuur 20a en 20b. Dit zal resulteren in een veel hogere nauwkeurigheid van de interpolatie van de oppervlakte metingen, omdat het over een kleinere 1D schaal is met een hogere datadichtheid. Het liefst wordt een grotere dataset van EC metingen (>1 EC meting per km² per maand) die uit meerdere jaren bestaat gebruikt om een betrouwbaarder resultaat te genereren. Dan kan ook een subset van de data gebruikt worden om het resultaat van de interpolatie te controleren. Een complexere Eurekaopener, waarbij ook de gemeten EC oppervlaktewatermetingen als inputdata worden gebruikt, zou mogelijk kunnen worden ingezet om zoutconcentraties en de bijbehorende schade op grotere schaal te analyseren (Schipper et al. 2014; Stuyt et al., 2013).



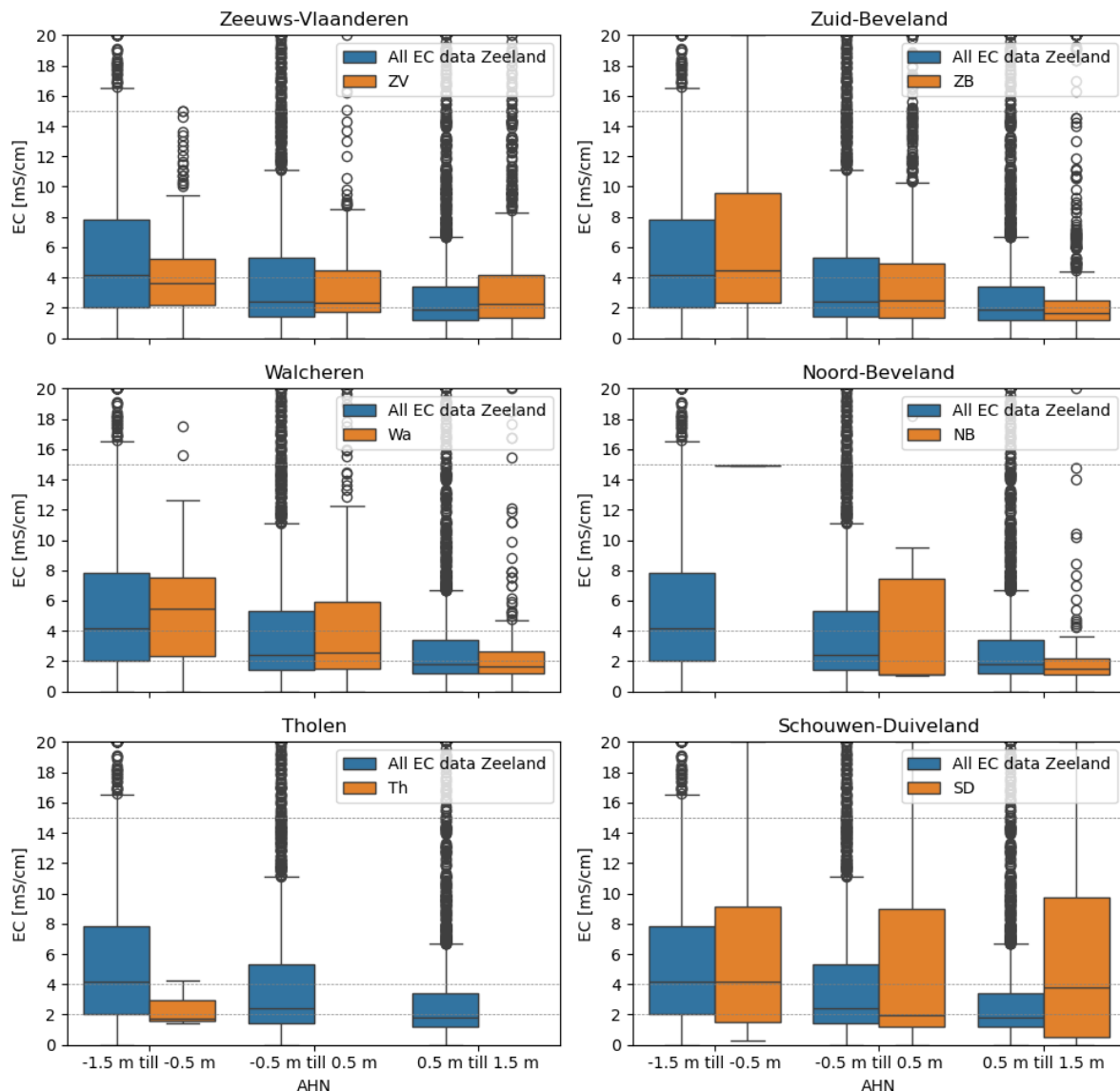
Figuur 20: a) Afwateringsgebieden shapefile-kaart van Zeeland. b) Waterwegen/Rivieren shapefile-kaart van Zeeland.

5.4.2 Correlatie en interpolatie van de EC metingen uit Zeeland

In het tweede deel van de verdiepende analyse is onderzocht of er correlaties zijn tussen de gemeten EC waarden in Zeeland en de kenmerken van de meetlocaties, zoals maaiveld hoogte, FRESHEM 1500 mg Cl/l grensvlak diepte ten opzichte van maaiveld en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen.

De correlatie tussen alle EC waarden uit Zeeland en de maaiveldhoogte (blauw) en de correlatie tussen de EC metingen uit één gebied uit Zeeland en de maaiveldhoogte (oranje) zijn zichtbaar in de boxplots van Figuur 21. Gemiddeld is de EC waarde van alle metingen net boven de 4.0 mS/cm bij de metingen tussen -1.5 en -0.5 meter NAP, net boven de 2.0 mS/cm bij de metingen tussen -0.5 en 0.5 m NAP en net onder de 2.0 mS/cm bij de metingen tussen 0.5 en 1.5 m NAP. Zoals te zien in Figuur 21, komt de gemiddelde van de boxplots van de regio's Zuid-Beveland en Walcheren sterk overeen met de gemiddelde van de totale dataset. De gemiddelde EC meting uit Zeeuws-Vlaanderen is in alle drie de categorieën maaiveldhoogte rond de 2.5 mS/cm. De

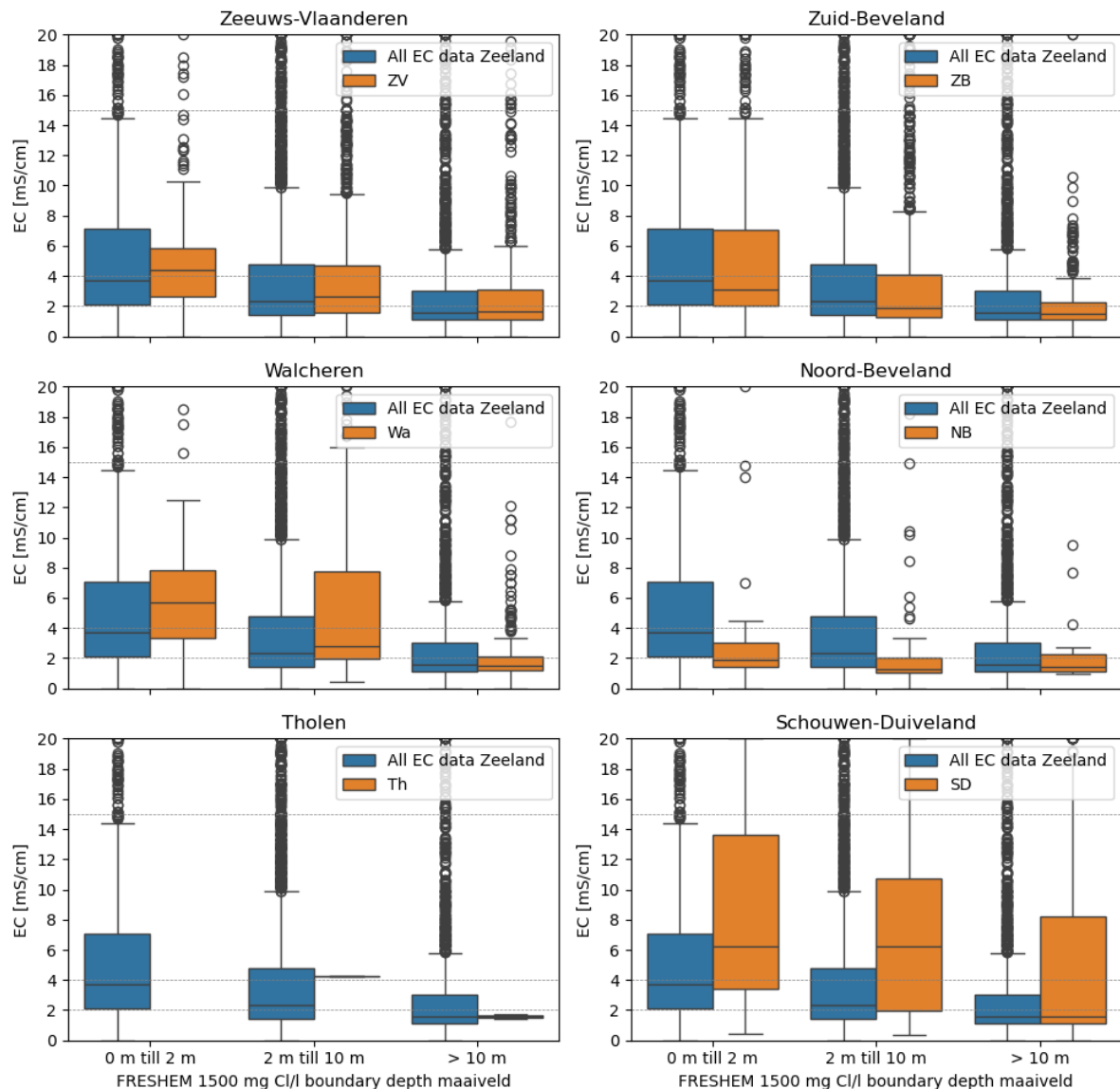
boxplots van Noord-Beveland en Tholen laten voornamelijk zien dat Noord-Beveland boven -0.5 meter NAP ligt met veel zoete metingen boven 0.5 NAP en dat er in Tholen alleen gemeten is onder -0.5 meter NAP, echter zijn dit wel voornamelijk lage EC metingen. Een verklaring hiervoor is dat boeren uit Tholen voornamelijk water gebruiken uit de lokale zoetwater geul. De gemiddelde EC waarde van de metingen op Schouwen-Duiveland is gelijk aan die van alle EC waarden uit Zeeland tot 0.5 meter NAP. De gemiddelde EC waarde tussen 0.5 en 1.5 meter op Schouwen-Duiveland is 4.0 mS/cm, dit is mogelijk te verklaren omdat er Schouwen-Duiveland geen mogelijkheid is om het land te doorspoelen.



Figuur 21: De EC metingen zijn op de x-as gegroepeerd in drie categorieën: tussen -1.5 m tot -0.5 m NAP, tussen -0.5 m tot 0.5 m NAP en tussen 0.5 m en 1.5 m NAP. De boxplots, met op de y-as de EC [mS/cm], van de EC metingen uit de afzonderlijke regio's in Zeeland (oranje) zijn geplott naast de boxplots met alle EC metingen uit Zeeland (blauw).

De correlatie tussen alle EC waarden uit Zeeland en de FRESHM 1500 mg Cl/l grensvlak diepte ten opzichte van maaiveld (blauwe) en de correlatie tussen de EC metingen uit één gebied uit Zeeland en de FRESHM 1500 mg Cl/l grensvlak diepte ten opzichte van maaiveld (oranje) zijn zichtbaar in de boxplots van Figuur 22. Gemiddeld is de EC waarde van alle metingen net boven de 4.0 mS/cm bij de metingen tussen een grensvlakdiepte van 0 en 2 meter onder maaiveld, net boven de 2.0 mS/cm bij de metingen tussen een grensvlakdiepte van 2 en 10 meter onder maaiveld en 1.5 mS/cm bij de metingen tussen een grensvlakdiepte van meer dan 10 meter

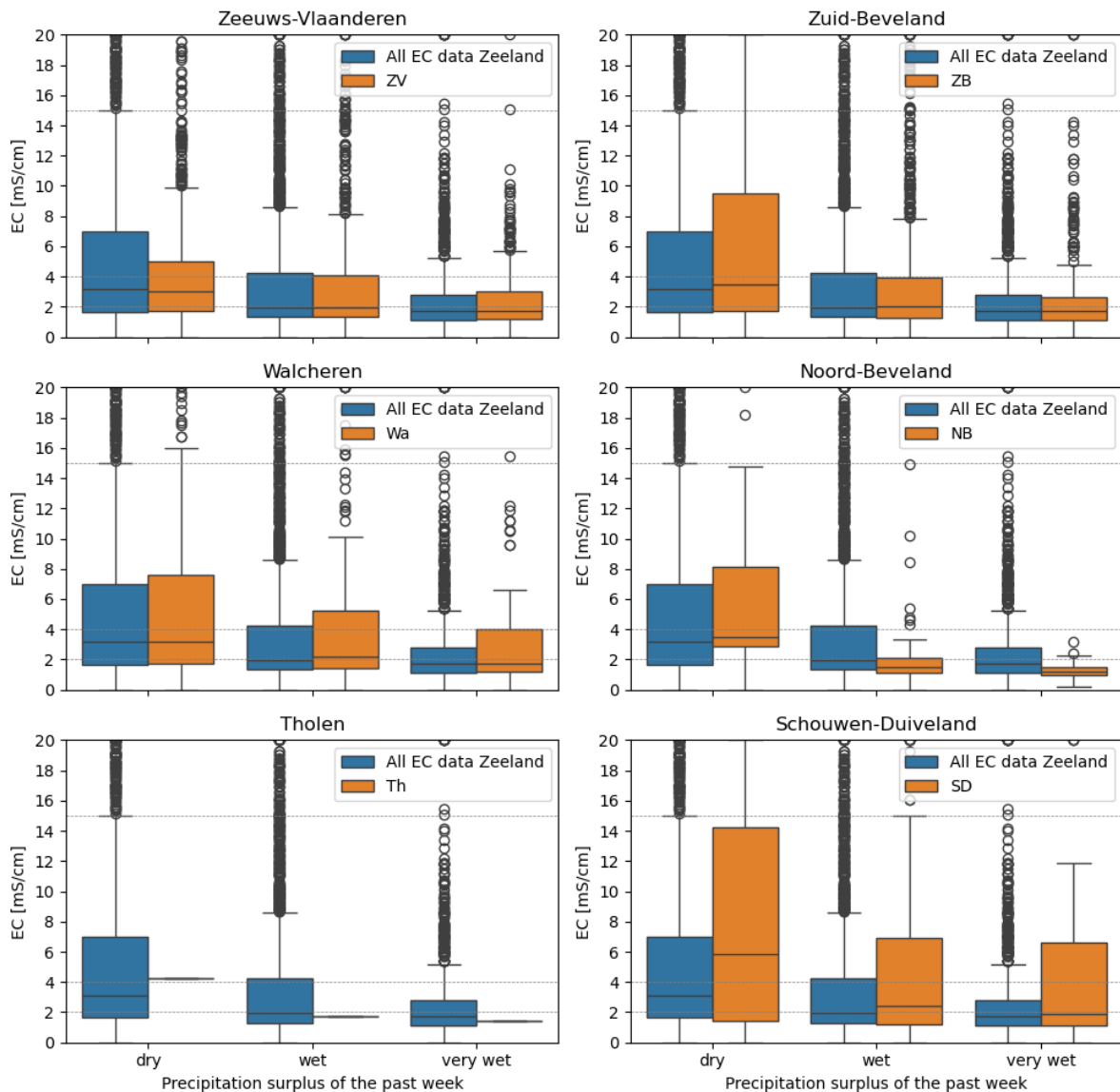
onder maaiveld. Zoals te zien in Figuur 22, komt de gemiddelde van de boxplots van de regio's Zeeuws-Vlaanderen, Zuid-Beveland en Walcheren sterk overeen met de gemiddelde van de totale dataset. De gemiddelde EC van alle metingen op Noord-Beveland < 2.0 mS/cm en is niet afhankelijk van de FRESHM grensvlak diepte ten opzichte van maaiveld. Tholen heeft niet voldoende metingen om een boxplot te tonen met de FRESHM grensvlak diepte ten opzichte van maaiveld. Het is logisch dat wanneer de FRESHM grensvlak ondiep ligt ten opzichte van het maaiveld dat de EC metingen ook hoger zijn zoals te zien is in de boxplot van Schouwen-Duiveland. Alleen zijn de EC metingen hier ook erg hoog bij een diep liggend FRESHM grensvlak.



Figuur 22: De EC metingen zijn op de x-as gegroepeerd in drie categoriën van de FRESHM 1500 mg Cl/l grensvlak diepte ten opzichte van maaiveld: tussen de 0 en 2 meter diep, tussen 2 en 10 meter diep en dieper dan 10 meter. De boxplots, met op de y-as de EC [mS/cm], van de EC metingen uit de afzonderlijke regio's in Zeeland (oranje) zijn geplott naast de boxplots met alle EC metingen uit Zeeland (blauw).

De correlatie tussen alle EC waarden uit Zeeland en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen (blauw) en de correlatie tussen de EC metingen uit één gebied uit Zeeland en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen (oranje) zijn zichtbaar in de boxplots van Figuur 23. Bij droog is het neerslag overschot tussen de -40 mm en 0 mm. Bij nat is het neerslag overschot tussen de 0 mm en 30 mm. En bij erg nat is het neerslag overschot

tussen de 30 mm en 70 mm. Gemiddeld is de EC waarde van alle metingen net boven de 3.0 mS/cm bij een voorafgaande droge periode, 2.0 mS/cm bij een voorafgaande natte periode en 1.75 mS/cm bij een voorafgaande erg natte periode. Zoals te zien in Figuur 23, komt de gemiddelde van de boxplots van de regio's Zeeuws-Vlaanderen, Zuid-Beveland, Walcheren en Noord-Beveland sterk overeen met de gemiddelde van de totale dataset. Tholen heeft onvoldoende metingen om een boxplot te tonen met het neerslag overschot. De trend in de boxplots is hetzelfde voor Schouwen-Duiveland alleen is de EC waarde gemiddeld een stuk hoger: 6.0 mS/cm in een voorafgaande droge periode, 2.5 mS/cm in een voorafgaande natte periode en 2.0 mS/cm in een voorafgaande erg natte periode.

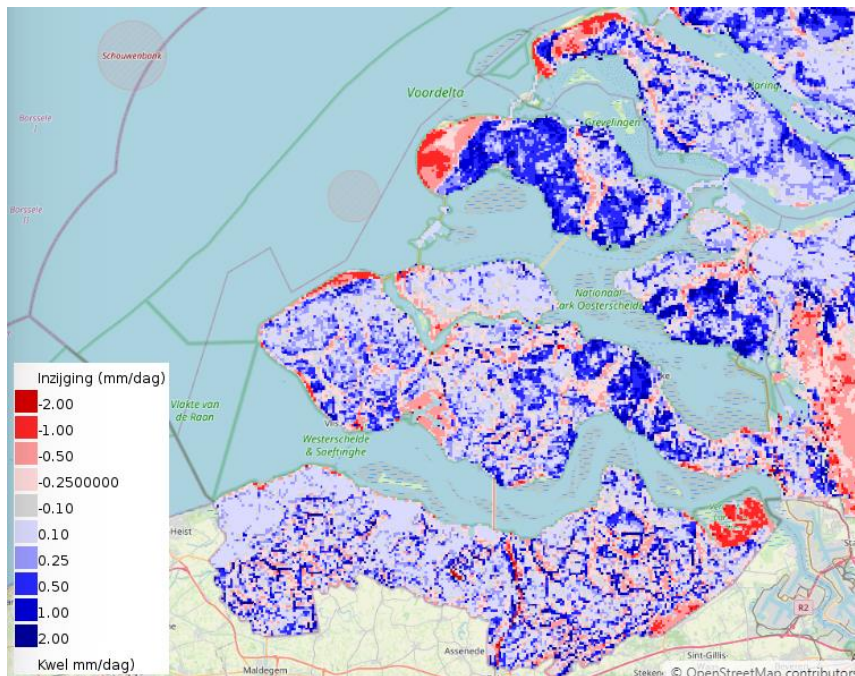


Figuur 23: De EC metingen zijn op de x-as gegroepeerd in drie categoriën van het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen: droog, nat en erg nat. Het neerslag overschot is de som van de neerslag van de voorafgaande zeven dagen min de verdamping van de voorafgaande zeven dagen. Bij droog is het neerslag overschot tussen de -40 mm en 0 mm. Bij nat is het neerslag overschot tussen de 0 mm en 30 mm. En bij erg nat is het neerslag overschot tussen de 30 mm en 70 mm. De boxplots, met op de y-as de EC [mS/cm], van de EC metingen uit de afzonderlijke regio's in Zeeland (oranje) zijn geplot naast de boxplots met alle EC metingen uit Zeeland (blauw).

Met dit tweede deel van de verdiepende analyse wordt aangetoond dat de gemiddelde zoutconcentratie van het oppervlakte water in relatie staat met de hoogte van het maaiveld, de diepte van de FRESHM 1500 mg Cl/l grensvlak en het neerslag overschot van de voorafgaande

zeven dagen. De boxplot trends in de regio's Zeeuws-Vlaanderen, Zuid-Beveland en Walcheren weerspiegelen voornamelijk de boxplot van alle EC metingen uit Zeeland en bevestigen ook de hypothesen. De EC waarden uit Noord-Beveland zijn 3% van de totale EC dataset van Zeeland en zijn relatief erg laag (2.3 mS/cm gemiddeld), zie ook Tabel 4, een mogelijke verklaring is dat er in Noord-Beveland een lage kwelflux is omdat het gebied hooggelegen > 0.5 NAP met relatieve hoge waterpeilen. De peilhoogten op Noord-Beveland zijn tussen -0.5 en -1.0 m NAP ten opzichte van bijvoorbeeld de peilhoogten op Schouwen-Duiveland rond de -2.5 m NAP (waterpeilenkaart,

<https://scheldestromen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8ea41983ba8c4e0682332e1cc2566a0c>). Zoutgehaltes zijn lager op Noord-Beveland doordat er minder zout in het oppervlaktewater komt door de relatief lage kwelflux (0.10 mm/dag), zie Figuur 24. De EC waarden uit Schouwen-Duiveland (10.2 % van alle metingen) zijn daarentegen erg hoog (gemiddeld 5.9 mS/cm), zie Tabel 4 en komen voornamelijk voor op Schouwen-Duiveland, omdat daar lage waterpeilhoogten zijn (rond de -2.5 m NAP) en een hoge kwelflux (0.50 mm/dag, Figuur 24) waardoor het zout makkelijk in het oppervlaktewater terecht komt.



Figuur 24: LHM4.1 Gemiddelde kwel inzijing 2011-2018 [mm/dag] (<https://data.nhi.nu/bekijk>).

De meest duidelijke correlatie is tussen de gemeten EC waarde en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen, aangezien deze correlatie in elke regio zichtbaar is. Er zit echter een verschil van 5.0 mS/cm tussen het 25 en 75 percentiel in alle drie de boxplot series van alle EC data van Zeeland. Dit maakt het moeilijk om een EC waarde direct nauwkeurig te voorspellen. Het is echter wel mogelijk om een indicatie te geven van de verwachte EC waarde op basis van de eerder genoemde drie kenmerken van de meetlocatie. Aan de hand van de indicatie kunnen boeren ervoor kiezen lokale maatregelen uit te voeren, door bijvoorbeeld gemalen te sluiten wanneer de indicatie van EC waarde van nabij gelegen sloten hoger is dan de EC indicatie van de boer zijn eigen sloten.

Een punt van discussie dat niet in het stageonderzoek is behandeld, maar wel invloed heeft op de dataset, is hoe om te gaan met een groot aantal (>30) metingen die op dezelfde dag in een gebied met gelijke kenmerken zijn genomen. Deze vele metingen kunnen afwijkingen vertonen ten opzichte van het gemiddelde en daardoor het gemiddelde beïnvloeden.

6 Conclusie

Het hoofddoel van de stageopdracht was om meer inzicht te geven in de EC metingen en daarbij horende onzekerheden, die verricht zijn met de Aquality App in Zeeland en tenslotte ook advies te kunnen geven zodat het enthousiasme bij de agrariërs hoog blijft worden gehouden om metingen te blijven doen voor de Aquality App.

Er zijn veel inzichten en daarbij horende onzekerheden verkregen uit de resultaten van de data analyse, de veldbezoeken en verdiepende analyses. De statistische analyse en visualisatie van de EC data, uitgevoerd met python, zijn gebruikt om een overzicht te creëren van de beschikbare data. Daar zijn twee interessante meet reeksen naar voren gekomen die verklaard kunnen worden met de FRESHEM kaart en het AHN. De eerste reeks is van een tijdserie van tot nu toe 15 maanden aan EC metingen die in dezelfde sloot zijn verricht. In de tijdserie is er een duidelijk verschil zichtbaar tussen de winter waar de EC gemiddeld rond de 2.0 mS/cm (zoet) ligt en in de zomer oploopt tot 14.0 mS/cm (zout). Dit valt te verklaren doordat er in de zomer geen zoetwatertoevoer is terwijl er wel veel zoute kweldruk optreedt in de sloot. De tweede datareeks gaat over de uitvoering van veel EC metingen in een korte periode in aangrenzende sloten op Zeeuws-Vlaanderen. De metingen laten een spatiële verziltingsgradiënt zien in de sloten. Dit gradiënt komt overeen met de FRESHEM-kaart, waar de grenswaarde van landbouwkundig zoet water zich dicht aan het oppervlak bevindt. Dit zijn ook de locaties waar brak slootwater voorkomt. Deze gebieden zijn tevens de laaggelegen delen van het landschap, zoals zichtbaar op het AHN van Zeeland. Tijdens het veldwerk op Zuid-Beveland is de handleiding getest en zijn er meer dan 50 metingen verricht. De veldmetingen zijn te correleren aan een zoete kreekrug en zoute omliggende poelgronden. Tijdens het veldwerk op Zuid-Beveland is ook gebleken dat niet elke boer zich al bezighoudt met de verzilting van slootwater en het meten van EC waarden. Daarom is het belangrijk om regelmatig data en bijbehorende resultaten aan de boeren in de omgeving te presenteren. Hoe meer boeren metingen uitvoeren, hoe groter de dataset wordt en hoe nauwkeuriger de analyses kunnen zijn. Er bestaat echter onzekerheid over de EC waarden in de Aquality App omdat er geen informatie beschikbaar is over de slootconditie en de diepte van de genomen metingen. In Zeeland kan stratificatie optreden in stilstaande sloten door zoute kwel, vergelijkbaar met de stratificatie die is gemeten in sloten op Terschelling. Bijvoorbeeld, op Terschelling varieerden de EC waarden in dezelfde sloot van 5.56 mS/cm aan het oppervlak tot 11.68 mS/cm op een diepte van 55 cm. Tijdens de verdiepende analyse is gebleken dat de interpolatietechniek ordinary kriging momenteel nog niet geschikt is om diepgaand inzicht te bieden in de EC metingen over ruimte en tijd. De interpolatie is op dit moment niet voldoende nauwkeurig en zou verbeterd moeten worden, bijvoorbeeld door interpolatie toe te passen op de waterwegenkaart van Zeeland. Daarnaast zijn er op dit moment nog te weinig metingen verricht om een zinvolle 2D-interpolatie van de sloten te realiseren. Het tweede deel van de verdiepende analyse resulteert in duidelijke correlaties tussen de oppervlakte EC waarden en de hoogte van het maaiveld, de diepte van de FRESHEM 1500 mg Cl/l grensvlak (grens tussen agronomisch zoet en brak water) en het neerslag overschot van de voorafgaande zeven dagen. Gemiddeld zijn op Noord-Beveland de oppervlakte EC waarden 2.3 mS/cm, een stuk lager dan de regio's Zeeuws-Vlaanderen (3.6 mS/cm), Zuid-Beveland (4.1 mS/cm) en Walcheren (4.5 mS/cm). Dat komt door de lagere kweldruk en hogere waterpeilhoogten in deze regio. Op Schouwen-Duiveland zijn de EC waarde gemiddeld een stuk hoger, namelijk 5.9 mS/cm gemiddeld. Dat komt door de hogere kweldruk en lagere waterpeilhoogten in deze regio. Het neerslagoverschot van de voorgaande zeven dagen vertoont in elke regio een correlatie met de gemeten EC waarde en kan mogelijk worden gebruikt als indicatie voor een nog uit te voeren EC meting door boeren.

7 Aanbevelingen

De aanbevelingen zijn onderverdeeld in aanbevelingen voor: de handleiding van de Aquality App, het promoten van het onderzoek in Zeeland zodat de boeren metingen blijven verrichten en de mogelijkheden van een vervolgonderzoek met de EC data van de Aquality App.

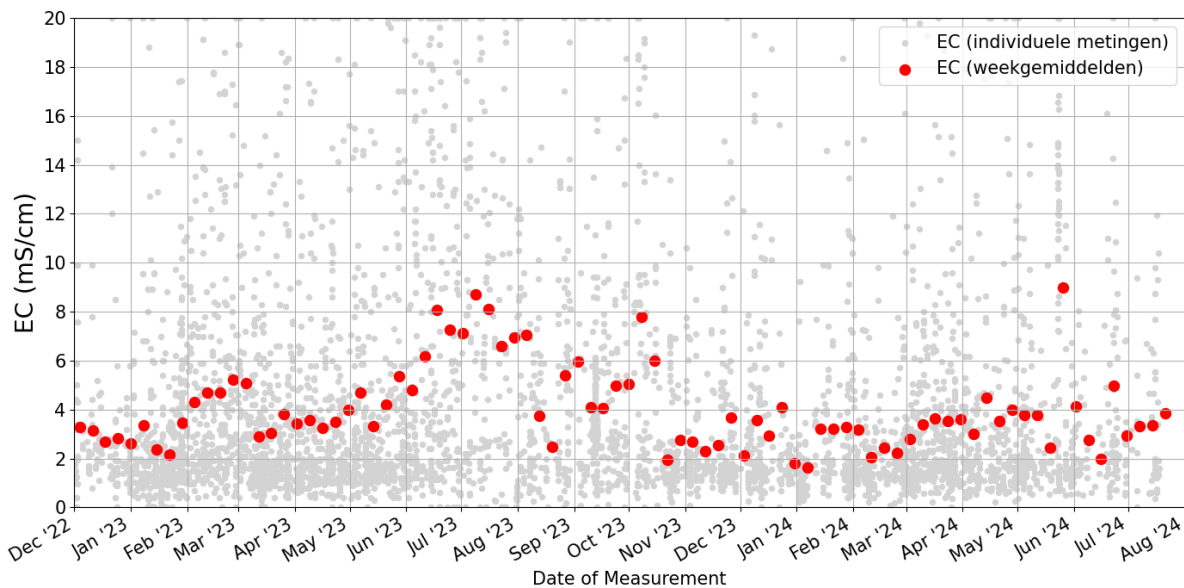
Aanbevelingen voor de handleiding van de Aquality App:

- Voor in de handleiding van de Aquality App is het goed om aan te geven hoe je een water monster kan nemen. Het is namelijk in praktijk niet heel makkelijk om een watermonster uit een sloot te halen. Het water van de sloot bevindt zich vaak tussen een brede laag riet. Deltares kan mogelijk een product ontwikkelen, daar moet nog over gebrainstormd worden, en verkopen/uitdelen zodat elke meting op dezelfde manier wordt uitgevoerd. Voordat er een watermonster uit de sloot wordt genomen moet de sloot ook eerst goed gemengd worden. Dit moet ook worden aangegeven in de handleiding.
- Het is belangrijk om in de handleiding aan te geven dat de meetlocatie in de Aquality App op de telefoon altijd verplaatst moet worden naar de locatie van de sloot waar de meting is verricht. Vaak zijn er aan beide kanten van een weg sloten en zo wordt het duidelijk in welke van de twee sloten de meting is verricht. De zoutgehalteconcentratie kan namelijk erg verschillen tussen de twee sloten. Een goede optie om de nauwkeurigheid van de meetlocatie te vergroten is om vaste meetlocaties te creëren in de Aquality App. Zo kan je makkelijk alle metingen die in een sloot binnen een paar meter zijn uitgevoerd koppelen aan een vast punt in de sloot. Dit maakt het ook makkelijker om een reeks aan EC metingen over tijd op te slaan.
- Het geeft meer inzichten in de Aquality App als een foto van de sloot gemaakt kan worden, de slootdiepte van de sloot op het moment van meten ingevuld kan worden, aan te kunnen geven op welke diepte de EC meting is uitgevoerd en of de sloot gemengd is voor het nemen van een EC meting. Er is namelijk de mogelijkheid dat een sloot gestratificeerd is, wat een onnauwkeurigheid in de gemeten EC waarde kan veroorzaken. Als er geen stroming in een sloot die in een kwelgebied ligt staat, kan er op de bodem een zoutere waterlaag ontstaan. Dan is het ook belangrijk om de sloot eerst goed te mengen voordat een EC meting genomen wordt, om zo de onnauwkeurigheid te verkleinen. Zo krijgen andere gebruikers van de Aquality App ook inzichten in de verrichtte meting zonder bij de meting aanwezig te zijn geweest. Deze aanpassingen moeten ook worden aangegeven in de handleiding van de Aquality App.
- Het toevoegen van een disclaimer over de gebruikte relatie tussen EC en Chloride in de Aquality App, die ook gebruikt is voor de legenda. De gebruikte relatie tussen EC en Chloride is gebaseerd op de ondergrondse situatie van Zeeland en kan verschillen voor andere gebieden op de wereld. De legenda in de Aquality App is gebaseerd op de formule van De Louw (2011) en is niet gebaseerd op de drinkwaterlimiet in Nederland.

Aanbevelingen voor het promoten van het onderzoek bij boeren in Zeeland:

- Om resultaten van deze analyse te delen met de boeren en hopelijk het enthousiasme om EC metingen uit te voeren hoog te houden is de door Joachim eerder gemaakte datareeks uitbereid, zie Figuur 25. Dit geeft een simpel maar duidelijk overzicht naar de tot nu toe verrichte EC metingen met de Aquality App. Zo zie je dat in de zomermaanden van 2023 de gemiddelden EC waarde rond de 8 mS/cm is geworden, dit is brak volgens

de legenda van de Aquality App. In de zomer van dit jaar zijn de gemiddelde EC waarden nu nog niet veel gestegen, dat komt doordat het heel veel heeft geregend. Dit zorgt ervoor dat de zoetwaterbel groot blijft en er minder zoute kwel kan plaatsvinden.



Figuur 25: Dagelijkse individuele EC metingen van de Aquality App uitgezet met EC weekgemiddelden van december 2022 tot augustus 2024.

- De twee beschreven data reeksen uit de resultaten van de data analyse kunnen ook gebruikt worden als twee goede voorbeelden van verrichte EC Aquality App metingen. De vele burger-data helpt om een analyse uit te voeren om te vinden op welke locaties het zoete regenwater nog beter vastgehouden kan worden om zo de effecten van verzilting in Zeeland tegen te gaan.
- Langs de boeren in het veld gaan, waar dan de Aquality App gepromoot kan worden en te kunnen onderzoeken welke EC of chloride concentratie boeren eigenlijk zelf zoet vinden? → Studenten uit Wageningen zoeken dit hopelijk uit in november.

Aanbevelingen voor verdere analyses:

- Voor het project van Deltares kunnen er meer (verdiepende) analyses uitgevoerd worden met de EC data van de Aquality App uit Zuid-Beveland, Zeeuws-Vlaanderen, Walcheren en Schouwen-Duiveland naast de twee analyses op de datareeksen uit dit onderzoek.
- Onderzoeken of de EC data te correleren is aan afvoergegevens, EC meetgegevens van waterschap Scheldestromen, legger-gegevens, neerslag- en verdampingdata, Zeelandmodel en EC meetdata uit eerdere projecten.
- De onzekerheid in locaties van de EC metingen in de Aquality App kwantificeren.
- Het aantal metingen per dag kan erg verschillen. Is er een manier om hier rekening mee te houden in de analyse? Zo kunnen er bijvoorbeeld veel metingen zijn verricht op een dag die afwijkt van het gemiddelde van de maand, wat ervoor zorgt dat het gemeten gemiddelde anders is dan het gemiddelde van de maand.
- De interpolatie van oppervlakte EC metingen verbeteren door te kijken naar 1D interpolatie over de rivierenkaart zodat het wel mogelijk wordt om interpolatie te kunnen gebruiken om EC waarden te voorspellen op een locatie of in een bepaalde periode.

- De gemeten resultaten gebruiken om oppervlakte debieten van zoutgehalteconcentratie in Zeeland te bepalen.

In de toekomst zullen Deltares en andere gebruikers van de Aquality App meer inzicht krijgen in de verzilting in Zeeland naarmate de Aquality App zich verder ontwikkelt, er meer metingen worden verricht en uitgebreidere analyses worden uitgevoerd. Dit zal bijdragen aan een verbeterde monitoring van de verzilting in Zeeland met de Aquality App. Zodra er een langdurige dataserie van zoutconcentratie meting beschikbaar is, zal het ook mogelijk zijn om bepaalde zoutconcentraties te voorspellen.

Dankwoord

Mijn stagebegeleiders Ilja America – van den Heuvel en Vince Kaandorp hebben mij veel geholpen gedurende mijn stage. Zo heeft Ilja mij tijdens de (wekelijkse) updates er vaak aan herinnerd dat het belangrijk is om naar een doel te werken zodat ik niet teveel verschillende dingen ga onderzoeken. Ilja heeft mij ook geholpen met het schrijven en debuggen van mijn python scripts, wat erg leerzaam was en mij ook veel tijd heeft gescheeld. Vince heeft mij geholpen met het opzetten van mijn eigen veldwerkonderzoek en heeft geregeld dat ik mee kon op twee andere veldwerken van Deltares gedurende mijn stage. Tijdens deze twee andere veldwerken heb ik veel geleerd van Edvard Ahlrichs hoe je geohydrologisch veldonderzoek uitvoert en had ik ook de ruimte gekregen om EC metingen te doen voor mijn eigen onderzoek, die erg nuttige waren voor de resultaten van mijn onderzoek. Teun van Woerkom wil ik bedanken voor zijn hulp bij het debuggen van mijn python codes. Jude King wil ik bedanken voor zijn hulp bij het maken van de interpolatie kaarten. Gualbert Oude Essink en Ilja wil ik bedanken voor het geven van feedback op mijn eerste versies van mijn stageverslag. Ilja, Vince en Gu, heel erg bedankt voor het begeleiden van mijn stage, ik heb er enorm van genoten en veel geleerd!

Bronnenlijst

2D data regression: Python Ordinary Kriging interpolation code - dr.T's Memorandum. (2021, April 2). <https://shuchanel.com/2d-data-fitting-ordinary-kriging-regression-by-python/>

America-van den Heuvel, I. (2024). PhD Proposal: Salinization and freshwater availability for agriculture, industry and households in future delta plans.

Aquality App (Nederlands) - the Deltares Aquality App - Deltares Public Wiki

Aydin, B. E. (2020). Model Predictive Control of Water Level and Salinity in Coastal Areas. <https://doi.org/10.4233/uuid:7f2b90c3-d6a9-4034-9304-7e520fd992c9>

Aydin, B., Rutten, M., Oude Essink, G. H. P., & Delsman, J. (2016). Polder Flushing: Model Predictive Control of Flushing Operations to Effective and Real Time Control of Salinity in Polders. *Procedia Engineering*, 154, 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.424>

- Benjamin Murphy, Roman Yurchak, & Sebastian Müller. (2024). GeoStat-Framework/PyKrige: V1.7.2 (v1.7.2) [Computer software]. Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.3738604>
- Conversion EC to Chloride—Zoetzout—Deltares Public Wiki. (2024). Retrieved from
<https://publicwiki.deltares.nl/display/ZOETZOUT/Conversion+EC+to+Chloride>
- CTD-Diver—Water Services and Technologies. (2024). Retrieved from
<https://waterservicestech.com/productos/ctd-diver/>
- De Louw, P. G., Eeman, S., Essink, G. H. P., Vermue, E., & Post, V. E. (2013). Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. *Journal of hydrology*, 501, 133-145.
- De Louw, P. G., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B. R., Gunnink, J., Van Baaren, E. S., & Oude Essink, G. H. P. (2011). Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(12), 3659-3678.
- De Louw, P., Oude Essink, G. H. P., Eeman, S., Van Baaren, E. S., Vermue, E., Delsman, J. R., Pauw, P. S., Siemon, B., Gunnink, J. L., & Post, V. E. (2015). Dunne regenwaterlenzen in zoute kwelgebieden. *Landschap*, 32(1), 4-15.
- Delsman, J. R., Groen, M. M. A., Groen, J., & Stuyfzand, P. J. (2014). Investigating summer flow paths in a Dutch agricultural field using high frequency direct measurements. *Journal of hydrology*, 519, 3069-3085.
- Delsman, J. R., Van Baaren, E. S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karaoulis, M. C., Pauw, P. S., ... & Essink, G. H. P. (2018). Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. *Environmental research letters*, 13(8), 084011.
- Drabbe and W. Badon Ghijben (2018). Post, V.E.A. Annotated translation of “Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam 1771–1788
<https://doi.org/10.1007/s10040-018-1797-z>
- Grond, V., Maas, G., Timmermans, W., & Broks, K. (2018). *Nederlandse steden en hun ondergrond: testboek* (No. 2018-64). Stowa.
- Hagedooren, H. (2018). Measuring and modelling to optimise a salinity monitoring network for use in the optimal control of flushing: Case study: Lissertocht catchment.
<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A4d55374e-e607-4c26-8615-7dc68143c8e0>

- Hardie, M., & Doyle, R. (2012). Measuring Soil Salinity. In S. Shabala & T. A. Cuin (Eds.), *Plant Salt Tolerance: Methods and Protocols* (pp. 415–425). Humana Press.
https://doi.org/10.1007/978-1-61779-986-0_28
- Moens, Frank, & Paulissen, M.P.C.P. (2009). Het zout rukt op, interview met.
<https://edepot.wur.nl/194993>
- Murphy, B. S. (2014, December). PyKrige: development of a kriging toolkit for Python. In *AGU fall meeting abstracts* (Vol. 2014, pp. H51K-0753).
- Natural neighbor interpolation—Wikiwand. (2024). Retrieved from
https://www.wikiwand.com/en/Natural_neighbor_interpolation
- Nielsen, M. A. (2015). *Neural Networks and Deep Learning*.
<http://neuralnetworksanddeeplearning.com>
- Nijhuis, S., & Pouderoijen, M. (2013). De polderkaart van Nederland. Een instrument voor de ontwikkeling van het laagland. *KNOB Bulletin*, 12, 137–151.
<https://doi.org/10.7480/knob.112.2013.3.626>
- Nitrate App/Deltares Aquality App | Deltares. (2024). Retrieved from
<https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/aquality-app>
- Olde, F. D. (2022, March 8). EC tabel schetst zouttolerantie. *Boeren Meten Water*.
<https://boerenmetenwater.nl/EC-tabel-schetst-zouttolerantie/>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 4(3), 313-332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- Oude Essink, G. H. P. (2001). Improving fresh groundwater supply—problems and solutions. *Ocean & Coastal Management*, 44(5-6), 429-449.
- Oude Essink, G. H. P., De Louw, P. G. B., Stevens, S., De Veen, B., Prevo, C., Marconi, V., & Goes, B. J. M. (2007). Voorkomen en dynamiek van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland-resultaten van een verkennende en provinciedekkende meetcampagne.
- Oude Essink, G. H. P., Pauw, P. S., Van Baaren, E. S., Zuurbier, K. G., De Louw, P. G. B., Veraart, J. A., MacAteer, E., Van der Schoot, M., Groot, N., Cappon, H., Waterloo, M. J., Hu-A-Ng, K. R. M., & Groen, M. M. A. (2018). GO-FRESH: Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening; rendabel en duurzaam watergebruik in een zilte omgeving. *Deltares Report*, 187.
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S., & De Louw, P. G. (2010). Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water resources research*, 46(10).

- Pool, M., & Carrera, J. (2011). A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2010WR010256>
- Van den Heuvel, I. A. (2024). Proposal: Salinization and freshwater availability for agriculture, industry and households in future delta plans.
- Reimann, L., Vafeidis, A. T., & Honsel, L. E. (2023). Population development as a driver of coastal risk: Current trends and future pathways. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1, e14. <https://doi.org/10.1017/cft.2023.3>
- Rijkswaterstaat. (2024). Krammersluizencomplex: Verleden, heden en toekomst - Feiten en cijfers - Bereikbaar Zeeland. Retrieved from: <https://www.magazinesrijkswaterstaat.nl/bereikbaarzeeland/2021/01/krammersluizen-complex-verleden-heden-en-toekomst>
- Rozemeijer, J. C., van den Eertwegh, G., Roelofsen, F., van der Toorn, L., van der Scheer, J., Klein, J., ... & Worm, B. (2018). Lumbricus stofstromenanalyse: routes van nutriënten uit metingen. *Deltares*.
- Rozemeijer, J. C., & Broers, H. P. (2007). The groundwater contribution to surface water contamination in a region with intensive agricultural land use (Noord-Brabant, The Netherlands). *Environmental Pollution*, 148(3), 695-706.
- Schipper, P. N. M., Janssen, G. M. C. M., Polman, N. B. P., Linderhof, V. G. M., Van Bakel, P. J. T., Massop, H. T. L. H. T. L., Kselik, R. A. L., Oude Essink, G. H. P., & Stuyt, L. C. P. M. (2014). €ureyeopener 2.1: Zoetwatervoorziening Zuidwestelijke Delta en Rijnmond-Drechtsteden. In *Alterra-rapport 2510*.
- Sibson, R. (1981). "A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2)". In V. Barnett (ed.). *Interpreting Multivariate Data*. Chichester: John Wiley. pp. 21–36.
- Slimmer doorspoelen—Zoetzout—Deltares Public Wiki. (2024). Retrieved from <https://publicwiki.deltares.nl/display/ZOETZOUT/Slimmer+doorspoelen>
- Stuyfzand, P. J. (1986, May). A new hydrochemical classification of water types: principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands. In *9th Salt Water Intrusion Meeting, Delft* (pp. 12-16).
- Stuyfzand, P. J. (2014). Hydrogeochemical (HGC 2.1), for storage, management, control, correction and interpretation of water quality data in Excel spread sheet (BTO 2012.244 (s)). KWR Watercycle Research Institute.
- Stuyt, L. C. P. M., Van Bakel, P. J. T., Delsman, J. R., Massop, H. T. L., Kselik, R. A. L., Paulissen, M. P. C. P., Oude Essink, G. H. P., Hoogvliet, M., & Schipper, P. N. M. (2013).

- Zoetwatervoorziening in het Hoogheemraadschap van Rijnland: Onderzoek met hulp van €ureyeopener 1.0. In Alterra-rapport 2439.
- Van Baaren, E. S., Delsman, J. R., Karaoulis, M. C., 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. In Deltares report 1209220 (Vol. 42, Issue 1).
- Velstra, J. (2023). De stuw die zout water afvoert en zoet water vasthoudt.
- Venema, G. S., Dolman, M. A., Smit, A. B., Jukema, G. D., Wisman, J. H., & Jager, J. H. (2019). Akkerbouw en vollegroondsgroenteteelt: Barometer Duurzame landbouw Noord-Brabant. <https://research.wur.nl/en/publications/akkerbouw-en-vollegroondsgroenteteelt-barometer-duurzame-landbouw>
- Veraart, J. A., Verdonschot, P. F. M., & Paulissen, M. P. C. P. (2012). Effecten verzilting zoete aquatische ecosystemen. <https://research.wur.nl/en/publications/effecten-verzilting-zoete-aquatische-ecosystemen>
- Vingerhoed, E., Groen, K., de Wit, L., & Velstra, J. (2017, January 20). De Zoete Stuw. zoete stuw. https://www.texelwater.nl/application/files/7414/9147/3367/De_zoete_stuw_1.pdf
- Vos, P. (2011). Atlas van Nederland in het Holoceen: Landschap en bewoning vanaf de laatste ijstijd tot nu [Map]. Bert Bakker.
- Vos, P. (2015). Origin of the Dutch coastal landscape: Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series. Barkhuis.
- Vos, P. C., & Knol, E. (2015). Holocene landscape reconstruction of the Wadden Sea area between Marsdiep and Weser: Explanation of the coastal evolution and visualisation of the landscape development of the northern Netherlands and Niedersachsen in five palaeogeographical maps from 500 BC to present. *Netherlands Journal of Geosciences*, 94(2), 157–183. <https://doi.org/10.1017/njg.2015.4>
- Zhu, Z., & Du, X. (2016). Reliability analysis with Monte Carlo simulation and dependent Kriging predictions. *Journal of Mechanical Design*, 138(12), 121403.

Internship report summary (English)

Abstract

During my internship at Deltares, starting on 25 March 2024, I conducted research on all electrical conductivity (EC) measurements taken in Zeeland using the Aquality App. The EC measurements, which were conducted by farmers, schoolchildren, and conservationists, are intended to enhance understanding of salinisation processes within the Zeeland region. The primary objectives of this research are to identify observable trends, provide deeper insights into the EC measurements and their associated uncertainties, as obtained through the Aquality App in Zeeland. Additionally, the research provides recommendations aimed at sustaining the engagement of farmers, thereby encouraging the continued use of the Aquality App for measurement activities. To start enhancing understanding statistical analysis and visualisation of the available measurements are conducted using python and then comparing them with basic data such as FRESH Salt groundwater distribution by Helicopter ElectroMagnetic survey in the Province of Zeeland (FRESH) and the Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). There is a time series of so far 15 months of EC measurements taken in the same ditch. The time series shows a clear difference between winter where EC of the ditchwater averages around 2.0 mS/cm (agronomically fresh) and in summer where the EC of the water rises to 14.0 mS/cm (very brackish/saline). This can be explained by the absence of freshwater inflow in summer while a lot of saline seepage occurs in the ditch. Many EC measurements (>30) were also conducted in adjacent ditches on Zeeuws-Vlaanderen in a brief period. These measurements show a salinisation gradient along the length of ditches. The spatial gradient can be explained by looking at the FRESH map and the AHN. During fieldwork in Zuid-Beveland the creek ridge (kreekrug) is visibly measured in the EC values using the Aquality App, and two farmers were interviewed about the impact of salt concentration on the growth of their crops. The manual of the Aquality App was evaluated during this fieldwork on which a number of recommendations are made for additions to the Aquality App. The measurement uncertainties that occur in practice when using the Aquality App such as the uncertainty in the actual location of the EC measurement are also addressed in this section. Stratification was measured in ditches on Terschelling, which introduces an uncertainty in the method by which the water is taken from the ditch for an EC measurement. Also on Terschelling, two transverse profiles from the Wadden Sea dyke were measured in the ditches adjacent to the fields. During the in-depth analysis, it was assessed whether interpolation techniques could be used to provide more insights from EC measurements over space and time. Additionally, the in-depth analysis demonstrated correlations between the EC measurements and the AHN, the depth of the FRESH boundary (the boundary between agronomically fresh and brackish water), and the precipitation surplus from the preceding seven days. Finally, examples are provided on how the EC data can be presented to keep farmers enthusiastic about the continued use of the Aquality App, and assorted options for further analysis of the EC measurements are discussed.

Introduction

Deltares has developed the Aquality App (<https://www.deltares.nl/software-en-data/producten/aquality-app>) to enable farmers and water managers to map water quality and nutrient losses at the parcel level. Using the Aquality App, farmers and residents can independently measure the salt concentration in surface water, drainage water, and groundwater with an electrical conductivity (EC) meter. Previously, only nitrate could be measured, and the app was also known as the Nitrate App. However, the app has since been further developed by Deltares to allow users to easily collect measurements of salt concentrations and other nutrients in water (nitrate, ammonium, and phosphate) as well as mineral nitrogen levels in the soil. Using measurements from the Aquality App, farmers can assess whether implemented measures are effective in reducing salinisation, for example. Reporting effective methods and results from salinisation studies is crucial, as farmers rely on the soil quality. Crops grow less effectively in soils with higher salt concentrations (Olde, F. D. 2022). In the long term, with the results of different studies, it is possible to then apply the most effective analytical methods and measures to reduce soil salinity in other regions that also face salinisation problems (Reimann et al., 2023). In the province of Zeeland, a project has been launched to encourage as many farmers as possible to participate in measuring salt concentrations. When more different farmers conduct measurements, it increases the spatial distribution of the data and allows for the creation of an extensive, long-term dataset. Currently, a database of EC measurements spanning 1.5 years has already been established, providing insights into the differences in salt concentrations in Zeeland's ditches between the hydrological summer and winter, as well as the ability to observe salinisation gradients in connected ditches. To gain more insights into seasonal and yearly trends, it is essential to continue conducting weekly or monthly measurements in the same ditches over multiple consecutive years. And to accurately identify spatial

trends, it is important that as many people as possible perform salt concentration measurements at various locations.

Zeeland is the largest arable farming province in the Netherlands and has the highest density of fruit cultivation per unit area. As a result, arable farming in Zeeland also boasts a high standard yield, as shown in Figure 1a. In the province of Zeeland, arable crops are cultivated in the polders. Polders are low-lying areas where the water level is artificially controlled by one or more water barriers to keep the land dry, allowing habitation and agricultural activities (Aydin, 2020; Nijhuis & Pouderoijen, 2013). All waterways or ditches within the dike boundaries are connected through hydraulic structures, ensuring that groundwater levels in the polders remain the same (Aydin et al., 2016). Worldwide, many low-lying coastal areas contain polders used for agriculture and about nine hundred million people live in these areas (Reimann et al., 2023). In delta areas, such as the Mississippi Delta in Louisiana (United States), the Ganges-Brahmaputra Delta (Bangladesh) or the Rhine-Meuse Delta (Netherlands), saline groundwater can rise to the surface and start salinising the fresh surface water in the polders, leading to reduced soil fertility (Aydin, 2020). In the future, many low-lying coastal areas are expected to face increased risks such as salinisation, land subsidence and sea level rise, compounded by population growth and the magnitude of climate change (Reimann et al., 2023).

Salinisation refers to the increase in salt content within the soil, groundwater, and surface water, which can lead to damage to growing crops (Olde, 2022) or affect drinking water supplies (Veraart et al., 2012). In Zeeland, the depth of brackish groundwater has always been close to the surface, as illustrated in Figure 1b. This depth is determined by the balance between freshwater input from rainfall above and saline seepage flux from below. The seepage increasingly reaches the root zones of plants and infiltrates the soil, affecting both groundwater and surface water (Moens & Paulissen, 2009). The amount of available freshwater and the degree of seepage flux depend on the subsurface soil conditions at each location. The freshwater layer is thicker in higher-elevated, permeable sandy areas compared to poorly permeable clay soils, which are often situated in lower-lying parts of the landscape and are more susceptible to saline seepage (Grond et al., 2018).

Research Questions

The primary goal of the internship is to provide greater insight into the EC measurements and associated uncertainties recorded using the Aquality App in Zeeland, and to offer recommendations to ensure that farmers and residents in Zeeland remain enthusiastic about continuing to conduct measurements for the Aquality App. This has been achieved by:

1. Conducting a statistical analysis and visualisation of the available EC measurements from the province of Zeeland to gain insights into the quantity of data, the locations where measurements have been taken, and the frequency of measurements at each location. Additionally, comparing the locations of the measured values with the AHN and FRESHEM data to determine whether the measured values can be explained.
2. Conducting field measurements with the following objectives:
 - Identifying measurement uncertainties that occur in practice when using the Aquality App.
 - Investigating whether stratification occurs in the ditches.
 - Examining how farmers manage their ditch water in practice.
 - Collecting additional data that can be used for the in-depth analysis.
3. Performing in-depth analyses of the available measurements by assessing whether the applied interpolation techniques can be used to provide more insights into EC measurements across space and time, and by examining whether correlations are evident between the EC value and characteristics of the measurement location, such as the AHN, FRESHEM depth of the interface, and the precipitation surplus from the preceding seven days.

Theory

Since 1000 A.D., dunes have formed, and inhabitants began constructing dikes and reclaiming land in Zeeland. Peat layers have subsided, and clay soils have matured due to the construction of dikes and the drainage of areas through dug ditches and trenches. The often low-lying, poorly drained clay on peat soils are commonly referred to as poelgronden. The sandy creeks, which have subsided much less because they consist of a mix of river deposits and cover sand, now rise above the poelgronden and are therefore known as kreekruggen (P. Vos, 2015; P. C. Vos & Knol, 2015).

A method used to counteract salinization of surface water involves flushing the polders with fresh water from the Maas or Rhine rivers. This flushing is done to ensure that there is a sufficient supply of fresh water in the polders to support freshwater agriculture. Areas with a need for flushing are visible in Figure 2d. A water board monitors everything from a control room and can decide if it is necessary to direct river water into the polders through ditches, canals, and pumping stations. Efficient water management in the polders can be achieved by employing Model Predictive Control to meet the increasing flushing demands (Aydin, 2016; Aydin, 2020).

Rainwater can form a large freshwater lens in sandy dunes. Freshwater floats on top of saline water, and when the rise in groundwater levels in the dunes is known, the Ghijben-Herzberg formula provides the depth (H) of the freshwater lens. However, this formula is only applicable to ideal situations, which are rare. For instance, the depth of the lens also depends on the depth of the impermeable layers in the subsurface, which in the Netherlands is a maximum of 15-25 meters deep (Carlston, 1963; Drabbe & Badon Ghijben, 1989). A correction factor is needed in the Ghijben-Herzberg formula, as the original formula does not account for the mixing of saline and fresh water or the dispersion factor (Pool & Carrera, 2011). In Zeeland, De Louw et al. (2015) demonstrated through field research that rainwater lenses in saline seepage areas are less than 2 meters deep and often absent (Oude Essink et al., 2007). These rainwater lenses prevent saline seepage water from reaching the root zone through capillary rise and are therefore crucial for agriculture. Their shallow position also makes them highly vulnerable to climate change, as drier summers will lead to thinner lenses due to evaporation and thus higher salt concentrations in surface waters.

Freshwater infiltration in the unsaturated zone occurs through macropores from the surface, while saline water infiltrates the unsaturated zone through capillary action via small pores from the (saline) groundwater level. Therefore, it is crucial to maintain sufficient irrigation in a polder to prevent salinization due to saline seepage. A high groundwater level in the soils is managed through drainage pipes and ditches, connecting the groundwater to the surface water. Depending on the drainage conditions, a certain mixing ratio of saline groundwater and fresh surface water is discharged, as shown in Figure 3 from Rozemeijer & Broers (2007). Saline seepage pressure, which can easily reach the surface water, salinizes the ditches surrounding the polders. Fresh groundwater sources can be temporarily used to increase the buffer capacity of surface water or to dilute saline irrigation water, thus reducing irrigation water stress. A lower groundwater level can lead to drainage ditches in dry summers being filled only with saline seepage. Farmers on a kreekkrug or large freshwater lens may also over-extract groundwater during dry summers, eventually extracting also saline water. The extracted groundwater is used by farmers in the polder and subsequently ends up in ditches and surface waters through drainage pipes. Salinization could increase in the future if drier periods become longer, rainfall more rapidly discharged through drainage pipes, and groundwater evaporation increases (de Louw et al., 2015).

The conductivity of water depends on the types of salt molecules present in the soil (formation factor) and the temperature. Field measurements of electrical conductivity (EC) require calibration against actual salt concentration through laboratory analysis (Rhoades, 1996). Although the procedures for measuring soil salt concentration may seem straightforward, variations in methodology can significantly affect the measured values and the interpretation of results (Hardie & Doyle, 2012). Electrical conductivity [25°C $\mu\text{S}/\text{cm}$] is often expressed in chloride concentration [mg/l] to facilitate comparison with measurements from outside the Netherlands, where chloride concentration is more commonly used. Electrical conductivity is also influenced by other substances such as HCO_3^- (Goes et al., 2009). De Louw (2011) developed a calibration curve with an associated formation factor through linear regression analysis of seventy-nine groundwater samples and a soil description of Zeeland to convert EC measurements to chloride concentrations. The relationship is: $\text{Cl} [\text{g L}^{-1}] = 0.36 * \text{EC} [\text{mS cm}^{-1}] - 0.45 \rightarrow \text{EC} [\text{mS cm}^{-1}] = (\text{Cl} [\text{g L}^{-1}] + 0.45) / 0.36$ for measurements in Zeeland. The lower threshold of $<0.65 \text{ g/l}$ is suitable for irrigation in arable farming and is consistent with the Aquality App, as shown in Table 1. This lower threshold is assumed in this report as agronomically sweet. It is important to note that this is still too brackish for drinking water users, nature, and horticulture.

Material and Methods

The data being analysed consists of all EC data from Zeeland collected using the Aquality App ([Aquality App \(Netherlands\) - the Deltares Aquality App - Deltares Public Wiki](#)). Other EC data sources are available, such as the EC measurements (+ temperature) from Tholen starting in 2023 by the Scheldestromen water board, but these are not considered in this study. The first measurement using the Aquality App in Zeeland by a farmer was recorded on November 18th, 2022. For the internship project, a data analysis

was conducted on EC data from Zeeland up to and including July 17th, 2024. The measured EC values are linked to the GPS coordinates of the measurement, as shown in Figure 8a. Table 3 provides an overview of the EC measurements from the Aquality App, categorized by region, hydrological summer and winter, surface type, and number of measurements per surface. The analysis is conducted using Python in Spyder, and the results are compared with FRESHM and AHN, as illustrated in Figure 8. Field research was conducted to evaluate the Aquality App's user manual and to assess uncertainties associated with the Aquality App data, such as salinisation. Fieldwork also helps understand how farmers manage their ditch water in practice and contributes to filling spatially missing data. With the additional data and the use of Python, the in-depth analysis investigates whether interpolation techniques can provide more insights into EC measurements over space and time. And correlations between EC values and location characteristics are explored with Python.

Results & Discussion

The results of the statistical analysis of the EC data are presented in Table 4. Over 5,500 EC measurements have been carried out using the Aquality App. The average EC value is 4.1 mS/cm, which is classified as brackish water and can be harmful to onions, potatoes, and bulb crops when used for irrigation or soil moisture. Grass, wheat, and sugar beets can also experience damage when irrigated with water with an EC of 4.0 mS/cm (Olde, 2022).

The boxplots of the hydrological summer and winter from the EC data of Zeeland show a variable pattern. Figure 10 illustrates this variability, starting with a boxplot of the EC values from the hydrological winter of 2021. On average, the EC value in the hydrological winter is around 2.0 mS/cm, while in the hydrological summer it is around 3.0 mS/cm. This variation can be explained by the fact that there is less rainfall and more evaporation during the summer compared to the winter. Thus, less fresh water is present in the system while the saline groundwater flux remains constant throughout the year.

A large cluster (>20 measurements) of EC measurements is found around a farmer's parcel near 's-Gravenpolder, as shown in Figure 13b. The time series of measurements began in January 2023 and continues to the present day. In this time series, a clear difference is observed between winter, where the EC averages around 2.0 mS/cm, and summer, where it rises to 14.0 mS/cm, as also illustrated in Figure 13a. An explanation for the summer increase in salt concentration in the ditch can be derived from the conceptual model on the relationship between hydrology and water quality in soil, groundwater, and surface water (Rozemeijer & Broers, 2007, Figure 3). Ditches situated deeper may become saline due to saltwater seepage during a dry summer when groundwater levels are lower and there is no connection to other ditches that could potentially supply fresh water. The AHN, as shown in Figure 13b, indicates that the measured ditch is indeed located at a lower elevation and thus subject to saltwater seepage.

Many field measurements were conducted on the same day by school children in Zeeuws-Vlaanderen, as shown in Figure 14a. The measured values in the ditches reveal a salinization gradient from brackish near the Westerschelde to fresher further inland from the Westerschelde. This spatial salinization gradient correlates with the FRESHM and AHN maps of the area, illustrated in Figures 14b and 14c. The FRESHM map shows the depth of the 1500 mg Cl/l boundary; near the Westerschelde, this boundary approaches the surface, which explains why the surface ditches in this region also exhibit higher EC values. Further from the Westerschelde, the FRESHM boundary is deeper, reducing the influence of saltwater seepage for the ditches. The depth of the 1500 mg Cl/l boundary is largely explained by the AHN map of the area. Locations where the 1500 mg Cl/l boundary is close to the surface are situated in the lowest parts of the area, thus being more connected to the saltwater influx in Zeeland. To clarify the measurement locations on the FRESHM map, the maps were overlaid, as shown in Figure 14d. This demonstrates that the measured values in the ditches correspond with the depth measurements from FRESHM.

On May 23, 2024, fieldwork was conducted in Zuid-Beveland to gain insights into distances between ditches, ditch size, ditch depth, vegetation, and landscape elevation in Zeeland. The goal was to gain experience in conducting measurements for the Aquality App and to test the associated manual. The results of the EC measurements in Zuid-Beveland are shown in Figure 15a. Many EC measurements in this area of Zuid-Beveland exceed 20 mS/cm, but there are also some very fresh measurements. An explanation for the variation in measurements can be found using the AHN and creek ridge maps of this area, which are visible in Figures 15b and 15c. The elevated kreekrug running through Zuid-Beveland retains much fresh rainwater due to its high porosity and permeability. This fresh groundwater also collects in the ditches, which was subsequently measured with the EC meter. However, the lower-lying surrounding pool grounds in this area experience more saltwater influx, which was also frequently measured during fieldwork in the ditches.

The potential stratification in ditches due to saltwater seepage was successfully measured in three areas during fieldwork on Terschelling from July 8th till July 10th 2024. The three areas where stratification research was conducted, labeled a, b, and c, are shown in Figure 17d, and the corresponding legend of the EC measurements is detailed in Table 5. In the area shown in Figure 17a, the EC values of the northern and southern ditches next to the road were first measured. There is a notable difference in EC values between the two ditches. The northern ditch, which is stagnant, is a shallow slightly brackish ditch with an EC value of 3.21 mS/cm. In contrast, the southern ditch, which has flow, is a deep brackish ditch with an EC value of 8.11 mS/cm at the surface and 8.31 mS/cm at a depth of 60 cm. The southern ditch is brackish because it is fed by water from the first salty parcel behind the Wadden Sea dike and is likely not stratified due to the flow present in it. Both ditches drain into a 100 cm deep main channel. The EC values at this location in the non-flowing main channel are: 3.52 mS/cm at the surface; 3.71 mS/cm at 50 cm depth; and 13.65 mS/cm at 100 cm depth. The stagnant main channel shows clear stratification. At the surface, the water is still slightly brackish, like the northern ditch, while at depth, the water is much saltier, even more so than in the southern ditch. This can likely be explained by additional saltwater pressure from the soil, as the ditch is also near the very saline Wadden Sea. The other two locations where stratification is measured are described in 5.3 Veldwerk Terschelling – Stratificatie & Verziltingsgradiënt. The areas where stratification was observed do not show flow in the ditches and are in low-lying areas with high saltwater intrusion pressure. This is illustrated in Figure 17e, which shows the measurement locations in combination with the AHN map. This confirms that the depth of measurement and the condition of the ditch have a significant impact on the measured EC values. When the Aquality App was introduced on Terschelling, it was indicated that the ditch needed to be well-mixed before a measurement was taken. Since this information is not included in the Aquality App, it introduces uncertainty into the measured EC values. It is essential to clearly describe the measurement methods and ditch conditions in the Aquality App's manual.

The first part of the in-depth analysis: Using the Python package PyKriging and Ordinary Kriging, the surface water EC measurements from Zuid-Beveland were interpolated monthly. The interpolation was performed over a rectangle encompassing all data points and was then clipped to the land boundaries of Zuid-Beveland. Interpolation was carried out for each month, with the resulting maps for February, May, August, and November shown in Figure 19. The interpolation results clearly illustrate the difference between the fresher winter and the saline summer. At Scheldeoord (green circle, bottom center of the map) in Zuid-Beveland, saline measurements are recorded throughout the year, indicating a location of saltwater intrusion. Conversely, at Veerse Meer (purple circle, top left of the map) in Zuid-Beveland, fresh measurements are observed year-round, suggesting the presence of a large creek ridge in the landscape. These results can also be explained by examining the AHN and the creek ridge infiltration system map of the area, as shown in Figures 8b and 8c. The interpolation represents a preliminary, simple interpolation of the EC measurements that does not yet account for drainage areas or the waterways and rivers map of Zuid-Beveland, as this would involve a more complex process and currently requires too much time. Improvements in interpolation are necessary for surface measurements, since waterways are not always interconnected, and significant differences in EC values can occur over short distances due to the surface water's connection with the upper groundwater.

The second part of the in-depth analysis demonstrates that the average salt concentration of surface water is related to the elevation of the land surface (Figure 21), the depth of the FRESHM 1500 mg Cl/l boundary (Figure 22), and the precipitation surplus from the previous seven days (Figure 23). The boxplot trends in the regions of Zeeuws-Vlaanderen, Zuid-Beveland, and Walcheren mainly reflect the boxplot of all EC data from Zeeland. EC values from Noord-Beveland, which account for 3% of the total EC dataset of Zeeland, are relatively low (average of 2.3 mS/cm), as shown in Table 4. A possible explanation is the low saltwater influx in Noord-Beveland due to its elevated position (> 0.5 m NAP) and relatively high ditchwater levels. For comparison, the water levels in Noord-Beveland range between -0.5 and -1.0 m NAP, while those on Schouwen-Duiveland are around -2.5 m NAP (ref: Waterpeilenkaart). Lower salinities in Noord-Beveland are due to the reduced salt content in surface water resulting from the relatively low saltwater influx (0.10 mm/day), as illustrated in Figure 24. On the other hand, EC values from Schouwen-Duiveland, which make up 10.2% of all measurements, are notably high (average of 5.9 mS/cm), as indicated in Table 4. These high values are predominantly found on Schouwen-Duiveland due to the low water levels (around -2.5 m NAP) and high saltwater influx (0.50 mm/day, Figure 24), which facilitates the transfer of salt into the surface water. The most evident correlation observed is between the measured EC values and the precipitation surplus of the previous seven days, as this correlation is evident across all regions. It could potentially be used as an indicator for future EC measurements by farmers.

However, there is a notable difference of 5.0 mS/cm between the 25th and 75th percentiles in all three boxplot series of the EC data from Zeeland. This variance makes it challenging to predict an exact EC value with high precision. Nonetheless, it is feasible to provide an indication of the expected EC value based on the three characteristics of the measurement location. And a point of discussion not covered in the internship but impacting the dataset is the handling of many measurements (>30) taken on the same day in an area with similar characteristics. These numerous measurements might show deviations from the average, potentially influencing the overall mean.

Conclusion

Insights and associated uncertainties were gained from the results of the data analysis, field visits, and in-depth analyses. The statistical analysis and visualisation of the EC data, conducted using Python, were used to create an overview of the available data. Two interesting measurement series emerged from this, which can be explained using the FRESHEM map and the AHN. The first series consists of a time series of EC measurements conducted over 15 months in the same ditch. This time series shows a clear difference between winter, where the EC averages around 2.0 mS/cm (fresh), and summer, where it rises to 14.0 mS/cm (saline). This can be explained by the absence of freshwater input during the summer while there is significant saline groundwater pressure in the ditch. The second dataset concerns a large number of EC measurements (>30) taken over a brief period in adjacent ditches in Zeeuws-Vlaanderen. The measurements reveal a spatial salinisation gradient in the ditches. This gradient corresponds with the FRESHEM map, where the boundary of agricultural fresh water is close to the surface. These are also the locations where brackish ditch water occurs. These areas are also the lower-lying parts of the landscape, as shown in the AHN of Zeeland. During the fieldwork in South Beveland, the manual was evaluated, and over fifty measurements were taken. The field measurements correlate with a fresh creek ridge (Kreekrug) and surrounding saline Poelgronden. It also became apparent during the fieldwork in Zuid-Beveland that not all farmers are yet addressing the salinisation of ditch water and measuring EC values. Therefore, it is important to regularly present data and associated results to local farmers. The more farmers who conduct measurements, the larger the dataset becomes and the more accurate the analyses can be. However, there is uncertainty regarding the EC values in the Aquality App because there is no information available about the ditch conditions and the depth of the measurements taken. In Zeeland, stratification can occur in stagnant ditches due to saline seepage, like the stratification measured in ditches on Terschelling. For example, on Terschelling, the EC values in the same ditch ranged from 5.56 mS/cm at the surface to 11.68 mS/cm at a depth of 55 cm. During the in-depth analysis, it was found that the interpolation technique, ordinary kriging, is currently not suitable for providing detailed insights into the spatial and temporal variations of EC measurements. The interpolation is not sufficiently accurate at present and would need to be improved. Which can be done by applying interpolation to the waterway map of Zeeland for example. Additionally, there are currently too few measurements to achieve a meaningful 2D interpolation of the ditches. The second part of the in-depth analysis reveals clear correlations between surface EC values and factors such as the elevation of the land surface, the depth of the FRESHEM 1500 mg Cl/l boundary (the threshold between agronomically sweet and brackish water), and the precipitation surplus over the previous seven days. On average, surface EC values on Noord-Beveland are 2.3 mS/cm, which is notably lower than in the regions of Zeeuws-Vlaanderen (3.6 mS/cm), Zuid-Beveland (4.1 mS/cm), and Walcheren (4.5 mS/cm). This difference is attributed to the lower seepage pressure and higher water levels in Noord-Beveland. On the other hand, Schouwen-Duiveland has a significantly higher average EC value of 5.9 mS/cm, due to higher seepage pressure and lower water levels in that region. The precipitation surplus from the previous seven days shows a correlation with the measured EC values in every region and could potentially be used as an indicator for future EC measurements by farmers.