

**Verziltingsstudie Hoogheemraadschap
Hollands Noorderkwartier**

Eindrapport februari 2013



| | |
|---------------|---|
| Documenttitel | Verziltingsstudie Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier |
| Status | Eindrapport |
| Datum | februari 2013 |
| Projectnaam | LMZW – deelgebiedstudie HHNK |
| Projectnummer | N20080278 |
| Opdrachtgever | Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier |

| | |
|---------|--|
| Auteurs | Jouke Velstra, Goswin van Staveren, Jacob Oosterwijk, Rianne van der Werf, Lieselotte Tolk en Koos Groen |
|---------|--|

INHOUDSOPGAVE

| | |
|---|-----------|
| Inhoudsopgave | ii |
| Lijst met figuren..... | v |
| 1 Inleiding | 1 |
| 1.1 Doel..... | 1 |
| 1.2 Achtergrond en context | 1 |
| 1.3 Kennishiaten - algemeen | 3 |
| 1.4 Kennisvragen en doelstelling – HHNK..... | 4 |
| 1.5 Afbakening | 5 |
| 1.6 Opbouw van het rapport..... | 6 |
| 2 Systemanalyse op het niveau van het Beheersgebied | 9 |
| 2.1 Inleiding..... | 9 |
| 2.2 Historische ontwikkeling als verklaring voor het patroon van zoutgehalten van het grondwater..... | 9 |
| 2.2.1 Ontstaansgeschiedenis beheersgebied HHNK..... | 9 |
| 2.3 Kartering van de zoet-zout verdeling van het grondwater | 14 |
| 2.3.1 Aanpak..... | 14 |
| 2.3.2 Verificatie en verbetering met chloridemetingen | 18 |
| 2.3.3 Resultaten kartering..... | 19 |
| 2.4 Conceptuele analyse van de grondwatersystemen aan de hand van de nieuwe zoet-zout kaart | 25 |
| 2.4.1 Eerder onderzoek..... | 25 |
| 2.4.2 Historische ontwikkeling en zoet-zout verdeling in verschillende gebieden..... | 26 |
| 2.5 Berekeningen van grondwaterstroming en zoutbelasting in het beheersgebied van HHNK | 33 |
| 2.5.1 Weerstand van de afdekkende laag en het basisveen | 36 |
| 2.5.2 Effect van de zoet-zout verdeling voor de grondwaterstroming | 38 |
| 2.5.3 Kwelkaart en zoutbelasting | 40 |
| 2.6 Veranderingen in grondwaterstroming en zoutbelasting als gevolg van autonome ontwikkelingen..... | 42 |
| 2.6.1 Autonome ontwikkelingen | 42 |
| 2.6.2 Vertaling naar verzilting..... | 44 |
| 2.7 Conclusies | 47 |
| 3 systemanalyse op Perceelsniveau..... | 49 |
| 3.1 Inleiding..... | 49 |
| 3.2 Eerder onderzoek en doelstelling | 49 |
| 3.3 Meetmethoden | 51 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.3.1 | Geofysische metingen [Algemeen] | 51 |
| 3.3.2 | EM34: Electro-magnetische meting | 53 |
| 3.3.3 | VES: Vertical Electrical Sounding | 53 |
| 3.3.4 | CVES: Continuous Vertical Electrical Sounding | 54 |
| 3.3.5 | Prikstok | 55 |
| 3.3.6 | Monsternamen en analyse grondwater | 55 |
| 3.3.7 | Hooghoudtproef : Bepaling doorlatendheid (k-waarde) | 57 |
| 3.3.8 | Divers (automatische druk-, geleidbaarheid- en waterstandopnemers) | 57 |
| 3.3.9 | Grondwaterstanden | 59 |
| 3.3.10 | Perceelafvoer | 59 |
| 3.3.11 | Neerslag en verdamping | 61 |
| 3.4 | Uitwerking en resultaten veldonderzoek | 61 |
| 3.4.1 | Keuze van de meetpercelen | 61 |
| 3.4.2 | Begreppeld perceel - Perceel Swart | 62 |
| 3.4.3 | Begreppeld perceel - Perceel Klaver | 76 |
| 3.4.4 | Resultaten perceel Vaalburg | 84 |
| 3.4.5 | Resultaten perceel Visser | 95 |
| 3.5 | Processen die het zoutgehalte in het perceel bepalen | 101 |
| 3.5.1 | Zoutgehalte ondiepe grondwater | 101 |
| 3.5.2 | Zoutgehalte van bodemvocht | 102 |
| 3.5.3 | Zoutgehalte van afvoer van drains en greppels | 103 |
| 3.5.4 | Rekenen aan perceelshydrologie | 103 |
| 3.5.5 | Betekenis van het onderzoek voor waterbeleid en landgebruik | 104 |
| 4 | Systeemanalyse op polderschaal | 106 |
| 4.1 | Watersystemen op polderschaal | 106 |
| 4.2 | Doelstelling en aanpak | 107 |
| 4.3 | Methoden | 107 |
| 4.3.1 | Handmatige EC metingen | 107 |
| 4.3.2 | Continue EC metingen van oppervlakte- en drainwater | 107 |
| 4.3.3 | Geofysische metingen van de ondergrond | 109 |
| 4.3.4 | Bestaande gegevens | 109 |
| 4.3.5 | Modelberekeningen grondwater en oppervlaktewater | 109 |
| 4.4 | Gebiedsbeschrijving polder de Schermer | 111 |
| 4.5 | Uitwerking en resultaten metingen polder de Schermer | 112 |
| 4.5.1 | Geofysische metingen en geohydrologische profielen | 112 |
| 4.5.2 | Ruimtelijke variatie van zoutgehalten in het oppervlaktewater | 115 |
| 4.5.3 | Variatie in de tijd van zoutgehalten in het oppervlaktewater | 115 |
| 4.6 | Resultaten modelsimulaties polder de Schermer | 117 |
| 4.6.1 | Huidige kwel en zoutbelasting | 117 |
| 4.6.2 | Verzoeting grondwater langs de zuidrand | 118 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.6.3 | Effecten zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering..... | 119 |
| 4.6.4 | Water- en zoutbalansen..... | 122 |
| 4.6.5 | Effecten verschillende peil- en drainageregimes..... | 126 |
| 4.7 | Gebiedsbeschrijving Wieringermeerpolder | 128 |
| 4.8 | Uitwerking en resultaten Wieringermeerpolder | 128 |
| 4.8.1 | Geofysische metingen en geohydrologische profielen..... | 128 |
| 4.8.2 | Variatie in de tijd van zoutgehalten in het oppervlaktewater..... | 131 |
| 4.9 | Resultaten modelsimulaties Wieringermeerpolder | 131 |
| 4.9.1 | Huidige kwel en zoutbelasting | 131 |
| 4.9.2 | Effecten zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering..... | 132 |
| 4.9.3 | Modelsimulatie van verzoeting grondwater langs IJsselmeerdijk | 134 |
| 4.9.4 | Water- en zoutbalansen..... | 135 |
| 4.10 | Resultaten SOBEK-modellering..... | 139 |
| 4.10.1 | Resultaten kwantiteitsmodellen | 139 |
| 4.10.2 | Resultaten waterkwaliteitsmodellering | 139 |
| 4.11 | Conclusies | 143 |
| 5 | Nut en noodzaak van doorspoelen | 145 |
| 5.1 | Inleiding..... | 145 |
| 5.2 | Landgebruik Schermer | 145 |
| 5.2.1 | Soorten gewassen en vee | 145 |
| 5.2.2 | Zouttoleranties..... | 148 |
| 5.3 | Huidige situatie | 150 |
| 5.3.1 | Watergebruik en berekening | 150 |
| 5.3.2 | Kwaliteit | 154 |
| 5.3.3 | Kosten in- en uitlaat..... | 155 |
| 5.4 | Wijziging doorspoelhoeveelheid..... | 160 |
| 5.4.1 | Maximale zouttoleranties | 160 |
| 5.4.2 | Minimale waterkwaliteit | 161 |
| 5.4.3 | Kosten in- en uitlaat..... | 163 |
| 5.5 | Niet doorspoelen | 163 |
| 5.5.1 | Kwaliteit water | 163 |
| 5.5.2 | Schade aan gewassen en vee | 163 |
| 5.5.3 | Alternatieven..... | 166 |
| 5.6 | Kosten-Baten analyse | 167 |
| 5.7 | Slotopmerkingen | 169 |
| 5.8 | Conclusies | 169 |
| 6 | Referenties | 171 |
| | Bijlagen..... | 1 |

Lijst met figuren

| | |
|---|----|
| Figuur 1.1. Schematische weergave van het water managementsysteem..... | 2 |
| Figuur 2.1. Paleografische reconstructie van Nederland omstreeks (a) 7500 (b) 5800 (c) 4750 (d) 2500 (e) 1950 en (f) 1200 jaar geleden..... | 10 |
| Figuur 2.2. Holocene geulenkaart van Noord-Holland (de Mulder, 1979) | 11 |
| Figuur 2.3 (a) Situatie rond 1300 met de dan gerealiseerde omdijkingen en de doorbraken van Zijpe, Heersdiep en Marsdiep. (Mulder, et.al. 2003), (b) Situatie rond 1700 met de dan gerealiseerde droogmakerijen en (c) Situatie rond 1900 met gekanaliseerd IJ..... | 12 |
| Figuur 2.4. Proces van bodemdaling door ontginning en ontwatering van West Nederland sinds de Middeleeuwen. | 13 |
| Figuur 2.5. Inpolderinggeschiedenis van Noord Holland, waarbij de ouderdom en de methode van inpoldering is weergegeven (Geuze et.al., 2009) | 14 |
| Figuur 2.6. VES metingen gebruikt voor het ontwikkelen van grensvlakken van gelijke zoutgehalten. De rode punten geven de metingen aan die in het kader van dit onderzoek zijn uitgevoerd (Schermer en Wieringermeerpolder)..... | 15 |
| Figuur 2.7. Voorbeeld van een inversie in een VES-meting (meting ten zuiden van Bergen). | 17 |
| Figuur 2.8. Links de meting en interpretatie zoals opgeslagen in het DINO Loket. En rechts de opnieuw geïnterpreteerde meting waarbij het model een goede fit geeft met de meetpunten. Het betreft hier overigens meting W14B0005. Opgemerkt dat het in dit geval geen gevolgen had voor de diepteligging van de grensvlakken. | 17 |
| Figuur 2.9. Resultaten verificatie grensvlakken op basis van chloridemetingen. | 20 |
| Figuur 2.10. Chlorideverloop onder het IJsselmeer. De grafieken tonen de inversie van een dunne brakke laag op zoet grondwater. (naar Volker, 1961 en de Vries, 1996) | 21 |
| Figuur 2.11. Diepte 500 mg/l grensvlak op basis van chloridemetingen en het voorkomen van inversies op basis van 200 mg/l (aangepast naar Pomper, 1981). | 23 |
| Figuur 2.12. Diepte van het 1000 mg/l, 5000 mg/l en 10000 mg/l chloride grensvlak en de dikte van de inversies in het beheersgebied van HHNK. | 24 |
| Figuur 2.13. Enkele diepteprofielen van chlorideconcentraties tot grotere dieptes. Links profielen waar een inversie op grotere diepte optreedt en rechts profielen waar dit niet het geval is..... | 26 |
| Figuur 2.14. Situatie 5100 jaar geleden (NOAA) en ca 700 jaar geleden (Mulder et.al., 2003) gecombineerd met de diepte van het 5000 mg/l grensvlak..... | 27 |
| Figuur 2.15. (a) Verspreiding en dikte(m) van de Eemafzettingen, (b) Holocene afzettingen, (c) situatie rond 1300 (Mulder et.al. 2003) en (d) voorkomen van de inversie in de Wieringermeerpolder. (a en b uit REGIS II.1) | 28 |
| Figuur 2.16. Doorsnede door West-Friesland die de insnijding van de zandige geulen tot in het Pleistoceen laat zien (Pons en Wiggers, 1959). De twee andere figuren tonen het geulsysteem aan de hand van het AHN en de omdijking sinds 1300 n Chr (Mulder et.al. 2003)..... | 29 |
| Figuur 2.17. Positie en bronnen van zoet en zout water voorkomens in een dwarsdoorsnede over de kustduinen bij Bergen. Het huidige Noordzeewater is ver ingedrongen door de hogere doorlatendheid van de bodem (naar Stuyfzand, 2007)..... | 30 |
| Figuur 2.18. Situatie rond 1300 (Hallewas, 1984) met daarop geprojecteerd de inversie. | 31 |
| Figuur 2.19. Schematische doorsnede van de grondwaterstroming in de ondergrond van Noord-Holland (naar Post, 2004). | 31 |
| Figuur 2.20. Maaiveld die de ligging van de diepe droogmakerijen toont (a), dikte van de deklaag (b) en diepteligging van het 5000 mg/l grensvlak (c). | 32 |
| Figuur 2.21. Polderpeilenkaart in m NAP (intwisbestand van HHNK). Het getoonde peil is het gemiddelde van winterpeil en zomerpeil, dat in de meeste gebieden vrijwel gelijk is. | 34 |
| Figuur 2.22. Stijghoogte op ca. 225 m -NAP (links) en stijghoogte op ca. 70m -NAP. Het regionale stijghoogteverloop van zee naar het achterliggend laagland en het effect van de Wieringermeerpolder en droogmakerijen is duidelijk zichtbaar..... | 35 |
| Figuur 2.23. Dikte van de deklaag op basis boringen, kaarten en hydrologische analyse peilbuizen. | 37 |
| Figuur 2.24. (a) Verschil in zoutconcentratie (g/l) voor en na optimalisatie van de zoutverdeling in de ondergrond in laag 15 van het model en (b) de verandering in de gesimuleerde stijghoogte | |

| | |
|---|----|
| (m) in het eerste regionale watervoerende pakket op ongeveer 15-70 meter diepte, laag 9 van het model. | 38 |
| Figuur 2.25. Een 3D weergave van de zoetzoutverdeling in het grondwatermodel. (geel is zoet, rood is zout). | 39 |
| Figuur 2.26. De met het grondwatermodel berekende kwelkaart voor een gemiddelde situatie. | 40 |
| Figuur 2.27. De met het grondwatermodel berekende zoutbelasting voor zomer (links) en winter (rechts). | 41 |
| Figuur 2.28. Links verziltingskaart polder en boezemwater uit de COLN studie uit de jaren 50 (de Vries en Vrijhof, 1958). Rechts chloridemetingen oppervlaktewater zomerperiode 1993-1997 (databank HHNK). | 42 |
| Figuur 2.29. Bodemdaling per poldereenheid (van Staveren en Velstra, 2011) op basis van de landelijke bodemdalingskaart (RIZA, 2005). | 43 |
| Figuur 2.30. Verandering in de temperatuur, neerslag en verdamping, volgens het KNMI '06 W+ scenario (uit Lenderink, 2006). | 44 |
| Figuur 2.31. Verschil in de gesimuleerde zoutbelasting 2005-2050 in de zomersituatie ten gevolgen van de voorspelde bodemdaling. Links de berekende verandering van kwel en wegzijging, rechts de verandering van zoutbelasting (in kg/ha/jr). | 45 |
| Figuur 2.32. Verschil in de gesimuleerde zoutbelasting 2005-2050 in de zomersituatie ten gevolgen van de voorspelde zeespiegelstijging. Links de berekende verandering van kwel en wegzijging, rechts de verandering van zoutbelasting (in kg/ha/jr). | 45 |
| Figuur 2.33. Verschil in de gesimuleerde zoutbelasting 2005-2050 in de zomersituatie ten gevolgen van de voorspelde verandering in het neerslagoverschot. Links de berekende verandering van kwel en wegzijging, rechts de verandering van zoutbelasting (in kg/ha/jr). | 46 |
| Figuur 3.1. Conceptueel model van grondwaterstroming in een perceel. (1) Drainage systeem, (2) Perceel systeem and (3) Regionaal systeem. | 49 |
| Figuur 2.1 Invloed bodem en grondwatereigenschappen op geleidbaarheid en weerstand. | 51 |
| Figuur 3.3. Schematische weergave van de meetopstelling van een VES (links) en de resulterende interpretatie in een lagenmodel (rechts) (bron http://www.georesearch.ro/geofizica_en.html). | 54 |
| Figuur 3.4 Meetopstelling CVES. | 54 |
| Figuur 3.5 Prikstokpunt en gebruik prikstok. | 55 |
| Figuur 3.6. In de koffer de monsterringen luchtdicht verpakt met tape. | 56 |
| Figuur 3.7. Centrifuge waarmee de water uit de bodemonsters is verkregen. | 56 |
| Figuur 3.8 Uitlezen diver in het veld. | 58 |
| Figuur 3.9 CTD-divers in watergangen. | 58 |
| Figuur 3.10 Meten grondwaterstand (links) en stijghoogteverschil (rechts). | 59 |
| Figuur 3.11 Meten aan drainafvoer; 1. Drainbuis; 2. Zandvang; 3. Uitstroomopening; 4. Diver. | 59 |
| Figuur 3.12 Schot in sloot met ctd-diver (Wieringermeer, perceel Visser). | 60 |
| Figuur 3.13 Regenmeter op het perceel in de Wieringermeerpolder. | 61 |
| Figuur 3.14 Veldwerkpercelen in de Schermer (links) en de Wieringermeer (rechts). | 62 |
| Figuur 3.15 Schematische weergave van het meetperceel Swart. | 63 |
| Figuur 3.16 Peilbuizen perceel Swart, met links de sloot. Greppels op 12, 24 en 36 meter (laatste niet zichtbaar) vanaf de sloot (links, niet zichtbaar). Afstanden en dieptes in meters. | 63 |
| Figuur 3.17 Perceel Swart, overzicht metingen. | 64 |
| Figuur 3.18. Perceel Swart met locaties van profielbeoordelingen. | 65 |
| Figuur 3.19. Resultaat Hooghoudtproef perceel Swart. | 65 |
| Figuur 3.20 Gemeten verloop van de grondwaterstand in diepe en ondiepe filter voor peilbuis 6. Het maaiveld ligt op ongeveer -345cm NAP. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter. | 66 |
| Figuur 3.21 Verloop grondwaterstand op perceel Swart, links 4 oktober 2009, rechts 15 november 2009. De sloot bevindt zich op 0 meter, greppels op 12 en 24 meter en zijn ca. 30-40cm diep. | 67 |
| Figuur 3.22 Afvoer 27 feb. – 3 mrt 2010 van de sloot bij perceel Swart als gevolg van neerslag. | 68 |
| Figuur 3.23. Van boven naar beneden: EC drain en sloot [mS/cm] (a); Afvoer in de sloot [m ³ /s] (b); Waterstand in de sloot (greppel is relatieve waarde) [cm NAP] (c); Grondwaterstand [cm NAP] (d) en Neerslag [mm] (e) op perceel Swart juli-oktober 2010. | 69 |

| | |
|---|----|
| Figuur 3.24. Gemeten weerstanden gemeten met de EM34 in mei 2009. | 69 |
| Figuur 3.25 Prikstokmetingen perceel Swart raai 1 (boven) en raai 2 (onder), mei 2009. Tevens is indicatief de weerstand omgerekend naar chloride. | 70 |
| Figuur 3.26 CVES meting perceel Swart, mei 2008. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. | 71 |
| Figuur 3.27 CVES meting perceel Swart, mei 2009. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de natte periode ingetekend. | 72 |
| Figuur 3.28 CVES meting perceel Swart, oktober 2009. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de droge periode ingetekend. | 72 |
| Figuur 3.29 CVES meting perceel Swart, april 2010. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. | 72 |
| Figuur 3.30 CVES meting oostelijk deel perceel Swart, april 2010. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. | 72 |
| Figuur 3.31. Situatieschets van CVES en locaties van bodemonsternamen, april 2010. | 73 |
| Figuur 3.32. Relatie chloride en sulfaat met en zonder zeewatercorrectie. | 74 |
| Figuur 3.33. Relatie gemeten chloride uit watermonsters en berekend chloride op basis van gemeten EC uit watermonsters en een vaste waarde voor sulfaat voor de drie percelen in de Schermer. | 75 |
| Figuur 3.34. Diepteprofielen van bodemopbouw (a); bulkgeleidbaarheid van bodem en water (b); geleidbaarheid watermonster gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (c); chloridegehalte gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (d). | 75 |
| Figuur 3.35 Afvoersysteem perceel Klaver en Vaalburg. | 76 |
| Figuur 3.36 Peilbuizen perceel Klaver, met links de sloot. Greppels op 16.8 en 30.2 meter vanaf de sloot (links, niet zichtbaar). Afstanden en dieptes in meters. | 76 |
| Figuur 3.37 Perceel Klaver en Vaalburg, overzicht metingen. | 77 |
| Figuur 3.38. Perceel Klaver en Vaalburg met locaties van profielbeoordelingen. | 78 |
| Figuur 3.39. Resultaat Hooghoudtproef perceel Klaver. | 78 |
| Figuur 3.40 Gemeten verloop van de grondwaterstand in diepe en ondiepe filter voor alle peilbuizen (boven) en peilbuis 10a/b (midden). Het maaiveld ligt bij peilbuis 10 op ongeveer -382cm NAP. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter. | 79 |
| Figuur 3.41 EM34 perceel Klaver (boven) en Vaalburg (onder), mei 2009. | 80 |
| Figuur 3.42 Prikstokmeting perceel Klaver, mei 2009. Omrekening van weerstand naar chloride met formatiefactor van 1. | 81 |
| Figuur 3.43 CVES meting perceel Klaver (rechts) en Vaalburg (links), mei 2009. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Onder de sloot is een weerstand hoger dan 100 Ohm m zichtbaar (wit), dit is waarschijnlijk een artefact van de inversiemethode (de elektroden hangen hier in het water). | 81 |
| Figuur 3.44. CVES meting perceel Klaver, mei 2009. Weerstanden in Ohmm. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. | 82 |
| Figuur 3.45 CVES meting perceel Klaver, oktober 2009. Weerstanden in Ohmm. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. | 82 |
| Figuur 3.46 CVES meting perceel Klaver, april 2010. Weerstanden in Ohmm. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Grondwaterstand ligt op 65 cm – mv dicht bij de sloot en op 80 cm –mv in het midden van de CVES. In stippellijnen de geïnterpreteerde stroming in deze natte periode. | 82 |
| Figuur 3.47. Situatieschets van CVES en locaties van bodemonsternamen, april 2010. | 83 |
| Figuur 3.48. Relatie gemeten chloride uit watermonsters en berekend chloride op basis van gemeten EC uit watermonsters en een vaste waarde voor sulfaat voor de drie percelen in de Schermer. Beide assen in log-schaal om de spreiding in het lage bereik van perceel Klaver inzichtelijk te maken. | 83 |
| Figuur 3.49. Diepteprofielen van bodemopbouw (a); bulkgeleidbaarheid van bodem en water (b); geleidbaarheid watermonster gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (c); chloridegehalte gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (d). | 84 |

| | |
|--|-----|
| Figuur 3.50 Drainagepatroon perceel Vaalburg en locaties peilbuizen Vaalburg en Klaver (Google Maps)..... | 84 |
| Figuur 3.51 Peilbuizen perceel Vaalburg. Drains op 0 en 10 meter. Afstanden en dieptes in meters. | 85 |
| Figuur 3.52. Resultaat Hooghoudtproef perceel Vaalburg | 85 |
| Figuur 3.53. Weergave van het verloop van de grondwaterstand bij een drain. Links het verloop zoals dit meestal wordt getekend en gemodelleerd. Rechts zoals de praktijk het in het perceel laat zien..... | 86 |
| Figuur 3.54 Gemeten verloop van de grondwaterstand voor alle peilbuizen. Het maaiveld ligt op ongeveer -400cm NAP en het drainageniveau op ongeveer -500cm NAP. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter. | 86 |
| Figuur 3.55 Prikstokmeting perceel Vaalburg raai 1 (boven)en raai 2 (onder), mei 2009. Tevens is indicatief de weerstand omgerekend naar chloride. | 87 |
| Figuur 3.56 CVES meting perceel Vaalburg, oktober 2009. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de droge periode ingetekend..... | 88 |
| Figuur 3.57 CVES meting perceel Vaalburg, april 2010. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Grondwaterstand op 90 cm –mv. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de natte periode ingetekend..... | 88 |
| Figuur 3.58 Situatieschets van CVES en locaties van bodemonsternamen, april 2010. | 89 |
| Figuur 3.59 Diepteprofielen van bodemopbouw (a); bulkgeleidbaarheid van bodem en water (b); geleidbaarheid watermonster gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (c); chloridegehalte gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (d)..... | 90 |
| Figuur 3.60 Chloridegehalte drainafvoer [g/m ³] op het perceel van dhr. Vaalburg op 15 april 2009. | 91 |
| Figuur 3.61 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); EC drain en sloot [mS/cm] (2); Temperatuur drain, sloot en barometer [°C] (3) en Neerslag [mm] (4) op perceel Vaalburg voor februari 2010. | 91 |
| Figuur 3.62 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); Gemeten waterhoogtes [cm] (2); EC drain en sloot [mS/cm] (3); Temperatuur drain, sloot en barometer [°C] (4) en Neerslag [mm] (5) op perceel Vaalburg voor begin mei 2010. | 92 |
| Figuur 3.63 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); Gemeten waterhoogtes [cm] (2); EC drain en sloot [mS/cm] (3); Temperatuur drain, sloot en barometer [°C] (4) en Neerslag [mm] (5) op perceel Vaalburg voor 23 juli – 14 september 2010. | 93 |
| Figuur 3.64 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); EC drain en sloot [mS/cm] (2); Temperatuur drain, sloot en barometer [°C] (3) en Neerslag [mm] (4) op perceel Vaalburg voor 9 – 14 augustus 2010. | 94 |
| Figuur 3.65 Perceel Visser, overzicht metingen..... | 95 |
| Figuur 3.66 Peilbuizen perceel Visser. Oude en nieuwe drains op diverse locaties. Afstanden en dieptes in meters. | 96 |
| Figuur 3.67. Perceel Visser met locaties van profielbeoordelingen. | 97 |
| Figuur 3.68 Gemeten verloop van de grondwaterstand voor alle peilbuizen. Metingen weergegeven ten opzichte van maaiveld. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter. | 98 |
| Figuur 3.69 Gemeten verloop van de grondwaterstand in het diepe en ondiepe filter voor peilbuis 2a/b. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter. | 98 |
| Figuur 3.70 EM34 perceel Visser, mei 2009..... | 99 |
| Figuur 3.71 Prikstokmeting perceel Visser, mei 2009..... | 100 |
| Figuur 3.72 CVES meting perceel Visser, mei 2009. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. | 100 |
| Figuur 3.73 CVES meting perceel Visser, oktober 2009. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. | 100 |
| Figuur 3.76. Modelbenadering op basis van FlexPDE waarbij verzadigde en onverzadigde zone volledig geïntegreerd worden gesimuleerd. Links de berekende neerslaglens tussen twee drains | |

| | |
|---|-----|
| met het adaptieve grid. Uitgelicht is de expliciete benadering van de drain op de schaal van centimeters. Rechts de berekende waterdrukken voor grondwater (blauw) en onverzadigde zone boven de waterspiegel (bruin). | 104 |
| Figuur 4.1. Locaties van de metingen in de Schermer. Links de watergangen en de locaties van de CTD-divers (hiervan is CTD-Sch1 is door onbekende oorzaak verdwenen tijdens de meetperiode) en rechts de locaties van de CVES en VES metingen. De rode lijnen geven de locatie van de profielen aan. | 108 |
| Figuur 4.2. Locaties van de metingen in de Wieringermeer, links de watergangen en de locaties van de CTD divers, rechts de locaties en nummers van de VES metingen (geel), CVES metingen en TDM meting (rood). | 108 |
| Figuur 4.3. Schematische weergaven van de waterbalans. Links de afstroming van percelen berekend met SWAP. Rechts de posten van de waterbalans. | 110 |
| Figuur 4.4. Modelgebieden Wieringermeer (links) en Schermer (rechts). De 1 ^e trap model betreft de gehele polder, de 2 ^e trap model betreft het met rood aangegeven gebied. In de Schermer is ook een waterkwaliteitsmodel (WQ) gemaakt, aangegeven in oranje..... | 110 |
| Figuur 4.5 Waterlopen Schermer (INTWIS, 2008), stromingsrichting, gemalen, inlaatpunten en poldernamen..... | 111 |
| Figuur 4.6 Schematische weergave stroming binnen Schermer-Noord. | 111 |
| Figuur 4.7 Schematische weergave stroming binnen Schermer-Zuid. | 112 |
| Figuur 4.8. Noord - Zuid doorsnede over de Schermer van de weerstandsverdeling in de ondergrond, tegen de achtergrond van de geohydrologische laagindeling. Metingen zijn afkomstig uit het DinoLoket met uitzondering van meting VES 3 die in deze studie is uitgevoerd. De pijlen geven de stromingsrichting van het grondwater aan..... | 113 |
| Figuur 4.9. West - Oost doorsnede over de Schermer van de weerstandsverdeling in de ondergrond , tegen de achtergrond van de geohydrologische laagindeling. Metingen zijn uitgevoerd binnen deze studie. De pijlen geven de stromingsrichting van het grondwater aan. | 114 |
| Figuur 4.10. De EC waarden zoals gemeten in het oppervlaktewater van de Zuid-Schermer in april 2009. Het omcirkelde gebied betreft een gebied dat doorgespoeld wordt met zoet water..... | 115 |
| Figuur 4.11. Gemeten EC waarden in de Zuid-Schermer in de drains van perceel Vaalburg (a) en in de watergangen en het gemaal (b) en de neerslag (c) in de periode van 20 juli 2010 tot 30 september 2010. De in het middelste paneel weergegeven EC waardes in de watergangen horen bij polder I, dat een eigen peil heeft (Sch2), het inlaatwater (Sch3), afvoer uit polder L (Sch5) en het water bij het gemaal (Sch4&6)..... | 116 |
| Figuur 4.12. Gesimuleerde kwel- en zoutbelasting van de Schermer in mm/dag voor de huidige situatie. (a) de kwelkaart, met in blauw de gebieden met quellend grondwater, de geel tot bruine kleur toont infiltrerend grondwater, (b) de zoutbelastingskaart en (c) het verschil in zoutbelasting tussen de zomer en wintersituatie, waarbij rood een hogere zoutbelasting in de zomer en blauw een hogere zoutbelasting in de winter weergeeft. | 118 |
| Figuur 4.13. Dalende chlorideconcentraties in het grondwater op de zuidelijke grens van de Schermer. Het betreft de meetpunten B19D0179 en B19D0034..... | 119 |
| Figuur 4.14. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting onder verschillende scenario's. (a) verandering in de kwelflux voor 2003 getransformeerd naar het KNMI W+ 2050 scenario. Een positieve verschilwaarde geeft aan dat de kwelflux is afgenomen; (b) de bijbehorende verandering in zoutbelasting. Een negatieve waarde geeft aan dat de zoutbelasting is afgenomen. (c) de gesimuleerde verandering ten gevolge van bodemdaling. | 120 |
| Figuur 4.15 In het bovenste paneel wordt weergegeven hoe de bedekking door de waterlopen in het model is. Door de resolutie van 100m en het expliciet oplossen van de secundaire waterlopen is in de meeste cellen open water aanwezig. In de onderste twee panelen wordt een illustratie gegeven van de dynamiek van de zoutbelasting (linksonder) en de stijghoogte (rechtsonder) in een cel zonder open water | 121 |
| Figuur 4.16. Effect van verandering in grondwaterstand en stijghoogte door klimaatverandering op kwel en infiltratie in de zomer. Bij een infiltratiepolder zakt de grondwaterstand bij het W+ scenario verder uit. Ook de stijghoogte in het 1 ^e watervoerend pakket zakt weg, maar minder sterk. Als gevolg hiervan neemt in het perceel de infiltratie af en neemt de infiltratie vanuit de sloot toe. Bij een kwelpolder zoals de Schermer gebeurt hetzelfde maar omdat de stijghoogte in het 1 ^e watervoerend pakket boven het slootniveau ligt is het resultaat anders. Hier neemt de kweldruk onder het perceel toe en neemt de kwel in de sloot af..... | 122 |

| | |
|---|-----|
| Figuur 4.17. Herkomst inkomend water in m ³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor Schermer-Zuid (berekening oppervlaktewaterbalans)..... | 123 |
| Figuur 4.18. Herkomst inkomend water in m ³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor Schermer-Zuid (berekening oppervlaktewaterbalans)..... | 123 |
| Figuur 4.19. Herkomst inkomend water in m ³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor Schermer-Noord (berekening oppervlaktewaterbalans)..... | 124 |
| Figuur 4.20. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in de Zuid-Schermer op basis van de waterbalans. | 124 |
| Figuur 4.21. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in de Noord-Schermer op basis van de waterbalans. | 125 |
| Figuur 4.22 Herkomst chloride in grammen als percentage van de post IN voor de Schermer in 2003 (berekening oppervlaktewaterbalans)..... | 125 |
| Figuur 4.23. Berekeningsresultaat van chlorideafvoer uit gedraineerde en begreppelde percelen bij traditioneel en natuurlijk peilbeheer..... | 126 |
| Figuur 4.24. Gecombineerd berekeningsresultaat chlorideafvoer uit begreppeld perceel met natuurlijk peilbeheer en gedraineerd perceel met traditioneel peilbeheer. | 127 |
| Figuur 4.25 Links: Waterlopen en bebouwing Wieringermeer (INTWIS, 2008), gemalen en inlaat. Rechts: Hevel wateraanvoersysteem dat plaatsvindt in afdelingen 3 en 4. | 128 |
| Figuur 4.26 Locaties CVES metingen in de Wieringermeerpolder geprojecteerd op de met het grondwatermodel berekende zoutbelasting (4.9.2)..... | 129 |
| Figuur 4.27 Kaart van Wieringen omstreeks 1849 met daarin polder Nieuwland (http://nl.wikipedia.org/wiki/Wieringen). | 129 |
| Figuur 4.28 a) CVES metingen in de polder Nieuwland en b) doorsnede op basis van REGIS II.1. . | 130 |
| Figuur 4.29 a) Geïnterpreteerde inversie op basis bestaande metingen Dinoloket. b)CVES metingen bij Middenmeer. | 130 |
| Figuur 4.30 a) CVES meting bij IJsselmeerdijk met intrusie van zoet water naar de polder. b) Detailmeting waarin ook de verzoeting van de deklaag zichtbaar is. | 131 |
| Figuur 4.31. Gemeten EC waarden in de de Wieringermeerpolder in de periode september 2009 tot augustus 2010..... | 131 |
| Figuur 4.32. Gesimuleerde kwel- en zoutbelasting van de Wieringermeerpolder in mm/dag voor de huidige situatie. (a) de kwelkaart, met in blauw de gebieden met kwellend grondwater, de rode kleur toont infiltrerend grondwater, (b) de zoutbelastingskaart voor de gemiddelde zomer- en wintersituatie. | 132 |
| Figuur 4.33. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting als gevolg van een zeespiegelstijging en een meestijgend peil van het IJsselmeer van 35cm..... | 133 |
| Figuur 4.34. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting als gevolg van een bodemdaling. | 133 |
| Figuur 4.35. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting als gevolg van een klimaatverandering. | 134 |
| Figuur 4.36. Gesimuleerde zoetwaterintrusie bij IJsselmeerdijk. a) de huidige situatie. b) CVES meting ter vergelijking van berekend resultaat. c) situatie in 2100 onder huidige omstandigheden. d) situatie in 2100 bij een peilstijging IJsselmeer van 1m. | 135 |
| Figuur 4.37. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in afdeling 1 op basis van de waterbalans. | 136 |
| Figuur 4.38. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in afdeling 3 op basis van de waterbalans. | 137 |
| Figuur 4.39. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in afdeling 4 op basis van de waterbalans. | 137 |
| Figuur 4.40 Herkomst inkomend chloride in g/m ³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor afdeling 1 van de Wieringermeer (berekening oppervlaktewaterbalans)..... | 138 |
| Figuur 4.41 Herkomst inkomend chloride in g/m ³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor afdeling 3 van de Wieringermeer (berekening oppervlaktewaterbalans)..... | 138 |
| Figuur 4.42 Herkomst inkomend chloride in g/m ³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor afdeling 4 van de Wieringermeer (berekening oppervlaktewaterbalans)..... | 138 |
| Figuur 4.43 Debiet bij lozingspunt van polder I en toont het verschil met het uitgangsmodel..... | 140 |

| | |
|---|-----|
| Figuur 4.44 sectie 236 ter plaatse van het centrale gedeelte van het noordoostelijke deelgebied. Voor aanpassingen..... | 140 |
| Figuur 4.46 sectie 236 ter plaatse van het centrale gedeelte van het noordoostelijke deelgebied. Na aanpassingen. | 141 |
| Figuur 4.46 Fracties berekend voor kop sloot 1 sectie 134. | 141 |
| Figuur 4.47 Delwaqsegment ter plaatse van het centrale gedeelte van het noordoostelijke deelgebied. | 142 |
| Figuur 4.48 Berekenen chlorideconcentraties op 1 augustus 2003 in polder I, de Schermer..... | 143 |
| Figuur 5.1. Percentages per gewastype | 147 |
| Figuur 5.2. Onderverdeling landgebruiktypen binnen de Schermer (LGN5)..... | 148 |
| Figuur 5.3. Schadedrempels van gewassen voor (Acacia Water, 2009). | 149 |
| Figuur 5.4. Chloridegehalte oppervlaktewater bij verschillende doorspoelhoeveelheden in de Zuid-Schermer, 2003..... | 162 |
| Figuur 5.5. Chloridegehalte oppervlaktewater bij verschillende doorspoelhoeveelheden in de Noord-Schermer. | 162 |

1 INLEIDING

De problematiek van zoetwatervoorziening en verzilting vraagt om inzicht in de mate van effecten en de haalbaarheid van verschillende oplossingsrichtingen in Laag Nederland. Zowel in generieke zin als via ervaring opgedaan in deelgebiedstudies. Verzilting is daarom als onderzoeksthema benoemd in de beide BSIK programma's Leven met Water (LMW) en Klimaat voor Ruimte (KvR). Voor het programma KvR is in 2011 de studie "Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw" onder leiding van Acacia Water afgerond.

In september 2007 heeft waterbeheerder Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (hierna te noemen HHNK) zich aangesloten bij het project Leven met Zout Water (hierna te noemen LMZW) voor een gebiedstudies rond het thema verzilting. Het project Leven met Zout Water maakt deel uit van het BSIK programma Leven met Water en is uitgevoerd door een breed consortium van kennisinstellingen (PPO-WUR, Alterra, IVM en VU) onder penvoerderschap van het Acacia Water. Voor deze deelgebiedstudie HHNK is intensief samengewerkt met de Vrije Universiteit.

Het project LMZW beoogt inzicht te verwerven in de processen rond verzilting en brakke watersystemen in het algemeen, de effecten van verzilting op gebruiksfuncties en de haalbaarheid van mitigerende en adaptieve oplossingsrichtingen.

In 2006 is gestart met de eerste stap, de inventarisatiestudie. In deze inventarisatie is een overzicht gemaakt van de kennis en informatie met betrekking tot de bovengenoemde aspecten rond verzilting in Nederland (Acacia Water, 2009).

In 2008 is de deelgebiedstudie van start gegaan voor HHNK, Deze deelgebiedstudie is in feite een verdere verdiepingsslag van de inventarisatiestudie, waarbij rekening is gehouden met de specifieke wensen en kennisvragen van HHNK. Het voorliggende rapport geeft de resultaten van de gebiedsstudie in het beheersgebied van HHNK.

1.1 Doel

De doelstelling van de studie is om deze saliniteitspatronen in grond en oppervlaktewater - in ruimte maar vooral in tijd - nader te onderzoeken. Dat is van praktische betekenis voor waterbeheerders. Gezien de taakstellingen om het zoetwaterverbruik terug te dringen en de KRW doelstellingen te behalen zal het waterbeer meer gestuurd gaan worden door waterkwaliteit. Het gaat daarbij om de gehalten aan zout- en nutriënten, die verschillende bronnen hebben en langs verschillende waterstromen in het oppervlaktewater terechtkomen. Beter inzicht in de processen maakt het mogelijk om nieuwe en zelfs onvermoede oplossingen te ontwikkelen.

1.2 Achtergrond en context

Het verschijnsel verzilting

De problematiek van verzilting is niet iets van de afgelopen jaren, maar eigenlijk al van alle tijden. Het zout kan afkomstig zijn van zeewater dat via rivieren, inlaat en schutsluizen de regionale wateren binnendringt of zijn oorsprong vinden in grondwater. In het grootste deel van West-Nederland is het diepere grondwater brak tot zout, wat zich met name manifesteert via kwel in de diepe droogmakerijen en ingepolderde gebieden. In het project LMZW richten we ons met name op de verzilting door het grondwater, ook wel interne zoutbelasting genoemd.

Het begrip verzilting, dat in dit rapport veelvuldig wordt gebruikt, is voor meerdere uitleg vatbaar en behoeft enige toelichting.

Structurele verzilting

Onder verzilting kan worden verstaan een structurele verandering van de zoutgehalten van het watersysteem als geheel. Dit proces is soms al waarneembaar of wordt verwacht in deze eeuw. Enerzijds kan brakke kwel (zoutbelasting) toenemen als gevolg van zeespiegelrijzing, bodemdaling, opbarsten van klei- en veenlagen; anderzijds kan het een gevolg zijn van de aankomst van dieper en zouter grondwater dat lateraal is opgedrongen. Beide processen zouden een opgaande trend in zoutgehalten te zien geven.

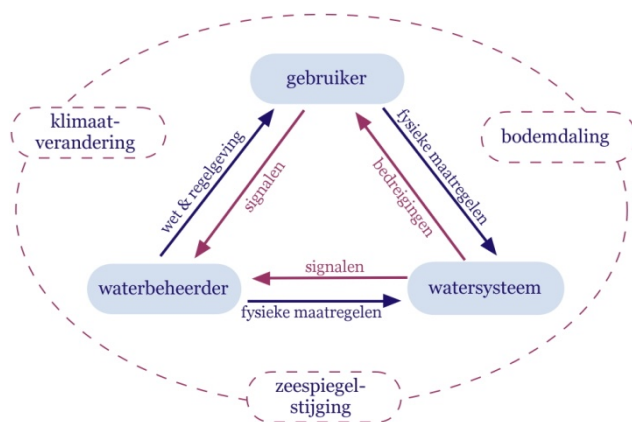
Tijdelijke verzilting (pieken)

Onder verzilting kan ook worden verstaan de toename van zoutgehalte gedurende droge zomers in polders met kwel van brak grondwater: gedurende de zomer neemt de oppervlakkige afstroming van zoet grondwater, afkomstig van de neerslag, af en wordt de continue kwel van brak grondwater bepalend voor de waterkwaliteit in de watergangen en soms zelfs wortelzone. Deze tijdelijke verzilting wordt vaak bestreden door polder en boezemwateren te verversen met zoet water (doorspoelen).

Klimaatscenario's voorspellen dat langdurige perioden met droogte en warm weer vaker zullen voorkomen in de zomers van deze eeuw. Dat leidt ertoe dat pieken in zoutgehalten vaker zullen optreden

Zoeken naar oplossingen

De huidige traditionele maatregelen tegen verzilting, veelal doorspoelen, staan onder druk. In droge zomers is bijvoorbeeld nu al de inlaat van zoet water problematisch door bijvoorbeeld het opdringen van zeewater bij lage rivierafvoeren. Er is dus dringend inzicht nodig in toekomstige ontwikkelingen van het watersysteem en het regionale en temporale patroon van zoutgehalte daarin. De verziltingsproblematiek wordt verder gecompliceerd doordat naast fysische processen ook het gebruik en beheer van land en water in beweging is. Zo is er de toenemende druk op het ruimtegebruik en verschillende eisen die worden gesteld aan het water in dezelfde gebieden voor de verschillende gebruiksfuncties. Bijvoorbeeld de hoge eisen die worden gesteld aan het aangevoerde zoete water ten behoeve van beregeningswater in onder andere specialistische teelten, die winstgevender zijn dan conventionele gewassen en van zoet beregeningswater afhankelijk zijn.



Figuur 1.1. Schematische weergave van het water managementsysteem

In feite moet de problematiek van verzilting benaderd worden in het spanningsveld van het gebruiker, watersysteem en waterbeheerder.

Reden om meer inzicht te verwerven in de problematiek en uiteindelijk "iets" te doen kan voortkomen uit de waarneming dat

- (i) het watersysteem is veranderd of gaat veranderen, dat
- (ii) gebruikers (socio-economische systeem) andere wensen hebben gekregen of omdat
- (iii) waterbeheerders andere afwegingskaders hebben gekregen (nieuwe wet en regelgeving, financieringsmogelijkheden, verschuiving invloed belanghebbenden).

Dit kan per gebied verschillen en is belangrijk bij het vaststellen van verantwoordelijkheden, afwegingscriteria en het scala van oplossingsrichtingen.

Een mogelijke oplossingsrichting is in te grijpen in het watersysteem, maar een andere oplossing is het functiegebruik (socio-economisch) aan te passen. In het eerste geval spreekt men van een mitigerende of sturende maatregel, het bestrijden van de ongewenste situatie. In het tweede geval van een adaptieve maatregel, het accepteren van situatie. Adaptieve maatregelen kunnen zich ook op bedrijfsniveau afspelen (waterrecirculatie, verzekeringen).

De problematiek en aanpak van verzilting is dus complex en besluitvorming zal vaak een langdurig proces inhouden. Het waterschap, zeker gezien de nieuwe rol die het heeft gekregen als integraal stroomgebiedsbeheerder, zal daarin een leidende rol gaan spelen.

1.3 Kennishiaten - algemeen

De belangrijkste huidige maatregel tegen verzilting is doorspoelen. In principe is dit een goede maatregel om de normwaarde van het oppervlaktewater te waarborgen. Echter als gevolg van autonome ontwikkelingen, en bevestigd in het Deltaprogramma, staat de beschikbaarheid van zoet water (water van goede kwaliteit) onder druk. Dit komt door:

- Toename zoutconcentratie uit kwel (waardoor meer doorspoelen noodzakelijk is)
- Minder beschikbaar water van goede kwaliteit (door lagere rivierafvoer en dus ook geringere beschikbaarheid van IJsselmeerwater, en opdringing van zeewater in rivieren)
- Hogere eisen van gebruikers (hoogwaardige kapitaalintensieve teelten)

Vanuit verschillende programma's en instanties worden zowel adaptieve als mitigerende maatregelen ontwikkeld. De vraag is of op dit moment het opstellen van maatregelen niet een stap te ver is, want veel vragen zijn nog niet beantwoord, zoals:

- is doorspoelen wel altijd nodig of is het een gewoonte
- is er werkelijk een toename van concentraties of overschrijdingsfrequenties
- of is het een gevolg van wens om economische risico's voor landbouw te minimaliseren
- of is het streven naar een norm wel nodig

Daarnaast is de kennis over het watersysteem ten aanzien van verzilting nog beperkt. Waar verzilting en normoverschrijdingen zullen toenemen is echter globaal wel te voorspellen. In zijn algemeenheid geldt dat waar nu verzilting optreedt het in de toekomst versterkt zal worden. De mate van toename is echter niet of nauwelijks onderzocht. Er zijn wel studies uitgevoerd naar de toename van het zoutgehalte in het grondwater maar het ontbreekt veelal aan doorvertaling naar oppervlaktewater en de situatie op het perceelsniveau.

In de jaren '40 en '50 van de vorige eeuw zijn studies uitgevoerd naar de zouttolerantie van landbouwgewassen, vee en natuur.

Het ging daarbij om de zouttolerantie bij een continu belasting van zout. Deze onderzoeken hadden oorspronkelijk een ander doel maar geven ons wel enig inzicht in de relatie tussen verzilting en opbrengst. Echter ten aanzien van normoverschrijdingen en daaraan gerelateerd piekbelasting is zeer weinig literatuur bekend. In zijn algemeenheid wordt voor landbouwgewassen, vee en natuur gesteld dat deze veel beter tegen zoutbelasting bestand zijn dan voorheen werd aangenomen.

1.4 Kennisvragen en doelstelling – HHNK

In 2007 is een globale studie watertekorten (Onderzoek Watertekort, Nelen & Schuurmans, 2007) uitgevoerd. Belangrijkste conclusies afgeleid uit het rapport, aangevuld met informatie van elders die relevant voor het project LMZW zijn:

- Binnen de studie is een waterbalans opgesteld waarin voor de post kwel en wegzijging de kwel- en wegzijgingskaart van de provincie Noord-Holland is gebruikt. Naast deze kaart zijn er diverse andere kaarten in omloop. Het probleem van alle kaarten is dat deze zijn gebaseerd op een globale berekening/inschatting van de kwelfluxen. Dergelijke kaarten geven wel een redelijk beeld waar kwel en wegzijging optreedt, maar het detailniveau is veelal beperkt. Daarnaast is de betrouwbaarheid van grootte van de flux niet groot omdat een toetsing aan meetwaarden niet of in beperkte mate is uitgevoerd.
- T.o.v. het droge jaar 2003 was het beruchte jaar 1976 een jaar met een hogere waterbehoefte. Dit komt omdat de droogste maand in dat jaar in juni/juli viel en veel gewassen - zoals bollen - nog op het land stonden en werden beregend. Dit in tegenstelling tot de droge periode in augustus 2003 waarin net geen watertekort is opgetreden omdat de bollen in augustus al van het land zijn. De waterbehoefte is dus afhankelijk van het tijdstip in het groeiseizoen.
- Het watertekort is niet alleen een kwestie van voldoende water, maar vooral een kwestie van voldoende zoet water.
- De meeste schade bij een watertekort treedt op bij de kapitaalintensieve teelten (bloembollen) rond Den Helder, de Zijpe, de Anna Paulowna en de Wieringermeerpolder. In deze gebieden kan de chlorideconcentratie bovendien hoog oplopen door het brakke kwelwater, het zeewater dat via de Koopvaarderschutsluis op de boezem komt en mogelijk ook door het zogenaamde 'varend spoelen' van zandschepen.
- Verwacht wordt dat de chlorideconcentratie en de intensiteit van de brakke kwel in de kop van Noord-Holland en de Wieringermeerpolder op termijn als gevolg van autonome ontwikkelingen (klimaat, zeespiegel, landgebruik) zal toenemen.
- In het rapport wordt aanbevolen om, wanneer een watertekort optreedt, eerst minder door te spoelen, pas daarna een beregeningsverbod te overwegen en vervolgens peilhandhaving in zand- en kleigebieden te minderen. Met minder doorspoelen kan meer water worden bespaard dan met een beregeningsverbod. Deze aanbeveling komt overeen met de huidige praktijk, maar wijkt af van de huidige voorgestelde volgorde in de regionale verdringingsreeks voor het IJsselmeergebied.
- Wanneer door vermindering van doorspoeling het chloridgehalte stijgt, levert dit vooral schade aan kapitaalintensieve teelten zoals de bollenteelt. Als maatregel wordt daarom voorgesteld om het doorspoelregime voor deze gebieden te

handhaven. Dit betekent tevens dat als gevolg van autonome ontwikkelingen in die gebieden òf meer zal moeten worden doorgespoeld, òf andere maatregelen moeten worden genomen. Immers de verwachting is dat de intensiteit van de brakke kwel zal toenemen.

Het Onderzoek Watertekort bevestigt de noodzaak van een beter inzicht en kwantificering van de zoutbelasting nu en in de toekomst (horizon 2050), gebiedsdekkend voor het beheersgebied van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.

De resultaten van het project LMZW zullen bij HHNK worden gebruikt voor de ontwikkeling of evaluatie van beleid over:

- De haalbaarheid en betaalbaarheid van de huidige waterbeheerpraktijk;
- Het faciliteren van landgebruiksfuncties door het watersysteem;
- De invulling van de (nieuwe) grondwaterbeheertaak;
- De verdeling van water uit het IJssel- en Markermeer in perioden van droogte (watertekort en verdringingsreeks);
- De haalbaarheid van de KRW-doelstellingen.

De primaire kennisvraag is gebiedsdekkend gericht voor het gehele beheersgebied:

- Inzicht in werking van grond- en oppervlaktewatersysteem. Kwantiteit en kwaliteit (in de zin van verzilting)
- Kwantificering van huidige zoutbelasting
- Kwantificering toekomstige (horizon 2050) zoutbelasting rekeninghoudend met autonome ontwikkelingen als bodemdaling, klimaatverandering, zeespiegelstijging en veranderend landgebruik.

De secundaire kennisvraag van HHNK is op lokale schaal een verbeterd inzicht te krijgen in de processen en waterstromen in het landelijk gebied. De kennis op dit detailniveau leidt tot een beter inzicht in de stromingspatronen onder een polder, op perceelsniveau en over de herkomst van de zoute kwel in de sloten.

1.5 Afbakening

Tot slot enkele opmerkingen over de afbakening van het project en de raakvlakken met andere thema's. Het project is een mix van kennisontwikkeling en praktijkgericht onderzoek. Het richt zich uitsluitend op de "interne" verzilting. De problematiek van beschikbaarheid van gebiedsvreemd zoet water uit het IJsselmeer en grote rivieren, dan wel de toename van externe verzilting (zoutindringing in de rivieren vanuit de zee) valt buiten het kader van deze studie. Deze problematiek vormt wel een belangrijke randvoorwaarde, maar is en wordt reeds in andere studies onderzocht (o.a. externe verzilting KNMI/RIZA 2005 en recent in het Deltaprogramma). De afbakening sluit goed aan bij de conclusies uit de Landelijke Droogtestudie, Zoetwaterverkenning Midden-West Nederland (Royal Haskoning, 2006), het Deltaprogramma IJsselmeergebied en de wensen en inzichten van waterbeheerders (RIZA, 2005, 2006). Daarin werd geconcludeerd dat grootschalige oplossingen weinig effectief en duur zijn en maatregelen ten aanzien van verzilting vooral effectief zijn als ze lokaal kunnen worden ingepast. Dit vereist kennis op het schaalniveau van de locale en regionale watersystemen, het niveau waarop deze studie zich richt.

Het project richt zich op oorzaak, gevolg en maatregelen met betrekking tot verzilting nu en in de toekomst, zowel op het afvoergebied als op perceelsniveau. Het gaat hier om zowel gestuurde als autonome ontwikkelingen.

De problematiek van verzilting is echter breder en gaat in feite ook over de beschikbaarheid van water van goede kwaliteit. Verzilting is daarmee direct gerelateerd aan de thema's verdroging en watertekorten.

Eén van de factoren die bepalend is voor de beschikbaarheid is de watervraag ofwel de behoefte tot het inlaten van gebiedsvreemd water. Het inlaten van gebiedsvreemd water is niet alleen gericht op bestrijding van verzilting of verbeteren van waterkwaliteit maar ook op kwantiteit. Denk aan het op peil houden om het onomkeerbare proces van bodemdaling en verzakking van kades en fundaties tegen te gaan. Hier wordt op ingegaan in hoofdstuk 5.

1.6 Opbouw van het rapport

Inleiding

Gezien de taakstellingen om het zoetwaterverbruik terug te dringen en de KRW doelstellingen te behalen zal het waterbeheer meer gestuurd gaan worden door waterkwaliteit. Het gaat daarbij om de gehalten aan zout- en nutriënten, die verschillende bronnen hebben en langs verschillende waterstromen in het oppervlaktewater terechtkomen. Kennis van de saliniteitspatronen in grond en oppervlaktewater - in ruimte en in tijd - is hiervoor onontbeerlijk. Beter inzicht in de processen maakt het mogelijk om nieuwe en zelfs onvermoede oplossingen te ontwikkelen.

De hydrologische systemen van percelen maken deel uit van grotere hydrologische systemen op de schaal van polders in Laag Nederland. Anders gezegd kan men ook stellen dat de poldersystemen eigenlijk opschalingen van perceelsystemen omvatten en zelf onderdeel zijn van het grotere regionale systeem op de schaal van het beheersgebied. Er is dus een nauwe samenhang tussen de verschillende systeem schalen.

Onze hypothese is dat de perceelsdrainage een bepalende rol speelt in de ruimtelijke variatie van zoutgehalten van het ondiepe grondwater maar ook in de variatie in de tijd van zoutgehalten van het oppervlaktewater. Processen op percelen zijn daarmee bepalend zijn voor de variaties op de schaal van een polder en bepalen de noodzaak en mogelijkheden tot waterbeheer. Binnen het project LMZW zijn de drie systeem schalen dan ook als uitgangspunt genomen.

Beheersgebied – hoofdstuk 2

In dit hoofdstuk staat de interne verzilting in het beheersgebied van HHNK centraal. De interne verzilting wordt veroorzaakt door kwel van brak grondwater, die ruimtelijk gezien een gevarieerd beeld vertoont in Noord Holland en ook verandert in de loop der tijd. De kwel en de interne verzilting is maar heel beperkt stuurbaar. Het is daarom van belang voor HHNK om inzicht te krijgen in de bepalende processen en stuurparameters. Ook als proces niet stuurbaar zal zijn in de praktijk, is dit inzicht noodzakelijk om te kunnen anticiperen op toekomstige veranderingen in die brakke kwel in de vorm van adaptieve en mitigerende maatregelen.

Op basis van oude kaarten en andere gegevens is een reconstructie gemaakt van de historische ontwikkeling van het watersysteem en de zoet/zout verdeling in de ondergrond sinds de vroege middeleeuwen (als gevolg van de voordurende verandering van factoren). Door reconstructie van de historische ontwikkeling van het watersysteem wordt kennis verkregen van de (mate van) invloed van de afzonderlijke factoren die geleid hebben tot de huidige zout-zout verdeling. Deze kennis is waardevol om te komen tot betere voorspellingen van de toekomstige ontwikkeling van de verzilting als gevolg van onder andere klimaatverandering en veranderend landgebruik.

Het verkrijgen van inzicht in de toekomstige interne zoutbelasting wordt nader geconcretiseerd door berekeningen met een grondwatermodel. Met dit voor het beheersgebied ontwikkelde model worden grondwaterstromingen en zoutbelastingen

berekend voor verschillende toekomstscenario's van bodemdaling, zeespiegelstijging en klimaatsverandering.

Perceelschaal – hoofdstuk 3

In overleg met het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) zijn twee polders geïdentificeerd voor detailonderzoek. Het betreft de Wieringermeerpolder en de polder de Schermer. De Schermer is representatief voor een diepe polder en daarmee geschikt voor onderzoek aan water- en stofstromen op lokale schaal en het ontwikkelen van de opschalingsmethodiek. De Wieringermeerpolder is een gebied met complexe problematiek.

Doelstelling is op lokale schaal een verbeterd inzicht te krijgen in de processen en waterstromen in het landelijk gebied. De kennis op dit detailniveau leidt tot een beter inzicht in de stromingspatronen onder een polder, op perceelsniveau en over de herkomst van de zoute kwel in de sloten. Binnen de systeemanalyse van de detailgebieden nemen de veldmetingen een belangrijke plaats in. De systeemanalyse omvat zowel gebeurtenissen op perceelschaal alsook op polderschaal. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de veldmetingen op perceelschaal weergegeven.

Door de combinatie van een aantal bestaande en nieuwe meetmethodes zijn de processen op perceelsschaal geobserveerd zoals niet eerder op dit detailniveau is gedaan. De toepassing van de CVES op de hier gebruikte hoge resolutie, een Schlumberger configuratie met een elektrode afstand van slechts 0.5m, heeft voor het eerst met een hoog detailniveau in beeld gebracht wat op een perceel de 2D verdeling van het zout water in de ondergrond is. Daarnaast hebben de continue metingen aan de kwaliteit het afvoerwater van de percelen een goed inzicht gegeven in de temporele variatie van het zoutgehalte. In combinatie met de neerslag en grondwaterstand metingen hebben we hiermee de processen die van belang zijn voor de vorming van een neerslaglens binnen een perceel kunnen identificeren en observeren. Op basis van deze metingen op perceelschaal kunnen een aantal conclusies worden getrokken. Achtereenvolgens worden de volgende aspecten behandeld, zoutgehalte in het ondiepe grondwater, bodemvocht en ten slotte afvoer van drainagemiddelen.

Polderschaal – hoofdstuk 4

Voor een nader onderzoek van watersystemen op polderschaal zijn in overleg met het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier de polders de Wieringermeer en de Schermer geïdentificeerd. In beide polders heerst een kwelstroom van brak grondwater, maar de polders verschillen in leeftijd, inrichting en hydrologische omstandigheden. Voor het onderzoek zijn veldmetingen uitgevoerd om de zoutgehalten van oppervlaktewater en grondwater te bepalen. Deze en bestaande gegevens zijn gebruikt om conceptuele en uiteindelijk mathematische modellen te ontwikkelen. Aan de hand van die modellen is onderzocht hoe de watersystemen zich gedragen op verschillende tijdschalen en wat de invloed is van autonome ontwikkelingen. Er zijn geen gebiedsdekkende karteringen of watersysteemsimulaties uitgevoerd. Daarvoor ontbraken de middelen in tijd en geld. Het doel is ook niet zozeer een oplossing te bieden voor de problematiek van de gehele Schermer en de Wieringermeer. Zoals is gezegd gaat het erom de hydrologische processen in polders met brakke kwel te ontrafelen en daarmee zicht te krijgen op oplossingen in algemene zin.

Het onderzoek heeft zich in de Schermer geconcentreerd op de Zuid-Schermer waar in het centrale deel de kwel sterke verzilting van grond- en oppervlaktewater tot gevolg heeft. In de Wieringermeer heeft het onderzoek zich toegespitst op de kwel en de verzoeting langs de rand in dit geval de IJsselmeerdijk.

Nut en noodzaak van doorspoelen – hoofdstuk 5

In polders in Laag-Nederland wordt in het zomer seizoen water ingelaten. Dit gebeurt om verschillende redenen. Ten eerste zijn er natuurlijke verliezen vanuit het oppervlaktewater die gecompenseerd moeten worden. Er is in het voorjaar en de zomer sprake van een neerslagtekort. De verdampingsverliezen van het oppervlaktewater moeten dus worden aangevuld. Een ander natuurlijk verlies is de wegzijging van water vanuit de watergangen naar het grondwater. Ten tweede wordt ook water ingelaten zodat boeren dit kunnen gebruiken voor beregening van het land en het drinken van hun vee. Er wordt echter vaak meer water ingelaten dan de natuurlijke verliezen en het gebruik door boeren. De reden hiervoor is de verzilting die in de zomer optreedt. De polder wordt dan "doorgespoeld" om de verzilting tegen te gaan, zodat het water aan bepaalde basisnormen voldoet en bijvoorbeeld de beregening en de veedrenking niet in gevaar komt. Dit deel van de inlaat is dus bedoeld om kwaliteit te handhaven. Het idee is dat het doorspoelen van polders veel efficiënter en zuiniger kan plaatsvinden door een betere afstemming op het gebruik. In dit hoofdstuk zal het begrip doorspoelen gebruikt worden voor het extra water dat wordt ingelaten voor agrarisch gebruik. Als boeren geen water zouden gebruiken voor beregening en veedrenking zou de peilhandhaving zich namelijk richten op de natuurlijke verliezen. De doorspoelhoeveelheden zijn de ingelaten hoeveelheden min de natuurlijke verliezen.

In dit hoofdstuk is uitgewerkt dat verandering van doorspoelhoeveelheid de situatie in de polder efficiënter en goedkoper kan maken dan de huidige situatie. Als case is de polder de Schermer onderzocht. Er is gekeken naar drie scenario's; volledige doorspoeling als in de huidige situatie, oftewel het referentiescenario, een scenario met wijziging van de doorspoelhoeveelheid en een scenario zonder doorspoelen. Tenslotte is een kosten-baten analyse gemaakt waarin de drie scenario's vergeleken zijn.

2 SYSTEEMANALYSE OP HET NIVEAU VAN HET BEHEERSGEBIED

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staat de interne verzilting in het beheersgebied van HHNK centraal. De interne verzilting wordt veroorzaakt door kwel van brak grondwater, die ruimtelijk gezien een gevarieerd beeld vertoont in Noord Holland en ook verandert in de loop der tijd. De kwel en de interne verzilting is maar heel beperkt stuurbaar. Het is daarom van belang voor HHNK om inzicht te krijgen in de bepalende processen en stuurparameters. Ook als proces niet stuurbaar zal zijn in de praktijk, is dit inzicht noodzakelijk om te kunnen anticiperen op toekomstige veranderingen in die brakke kwel in de vorm van adaptieve en mitigerende maatregelen.

Voor delen van het beheersgebied van HHNK bestaan al diverse interpretaties van de zoet-zout verdeling in het grondwater. In dit hoofdstuk wordt een nieuwe meer systematische interpretatie gegeven. Enerzijds is het doel een relatie te leggen tussen het zoet-zout patroon en de historische ontwikkeling van het gebied. Dat is van belang omdat dat patroon het resultaat is van zowel natuurlijke processen als menselijke beheersmaatregelen, die al eeuwen geleden in gang zijn gezet. Door projectie van deze trends naar de toekomst kan de verzilting op lange termijn beter worden ingeschat.

Het verkrijgen van inzicht in de toekomstige interne zoutbelasting wordt nader geconcretiseerd door berekeningen met een grondwatermodel. Daarmee komen we bij het tweede doel van deze kartering, namelijk het leveren van de noodzakelijke input voor de modelberekeningen. Met dit voor het beheersgebied ontwikkelde model worden grondwaterstromingen en zoutbelastingen berekend voor verschillende toekomstscenario's van bodemdaling, zeespiegelstijging en klimaatsverandering. De belangrijkste resultaten worden behandeld in het tweede deel van dit hoofdstuk. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van het grondwatermodel wordt verwezen naar bijlage 13.

Paragraaf 2.2 gaat in op de geografische en waterhuishoudkundige ontstaansgeschiedenis van het beheersgebied. De kartering van het zoutgehalte van het grondwater komt aan de orde in paragraaf 2.3, gevolgd door een conceptuele analyse van het grondwatersysteem in paragraaf 2.4 aan de hand van de kartering. Tenslotte worden in paragraaf 2.7 de berekeningen van kwel en zoutbelasting behandeld onder de huidige omstandigheden en voor de toekomst.

2.2 Historische ontwikkeling als verklaring voor het patroon van zoutgehalten van het grondwater

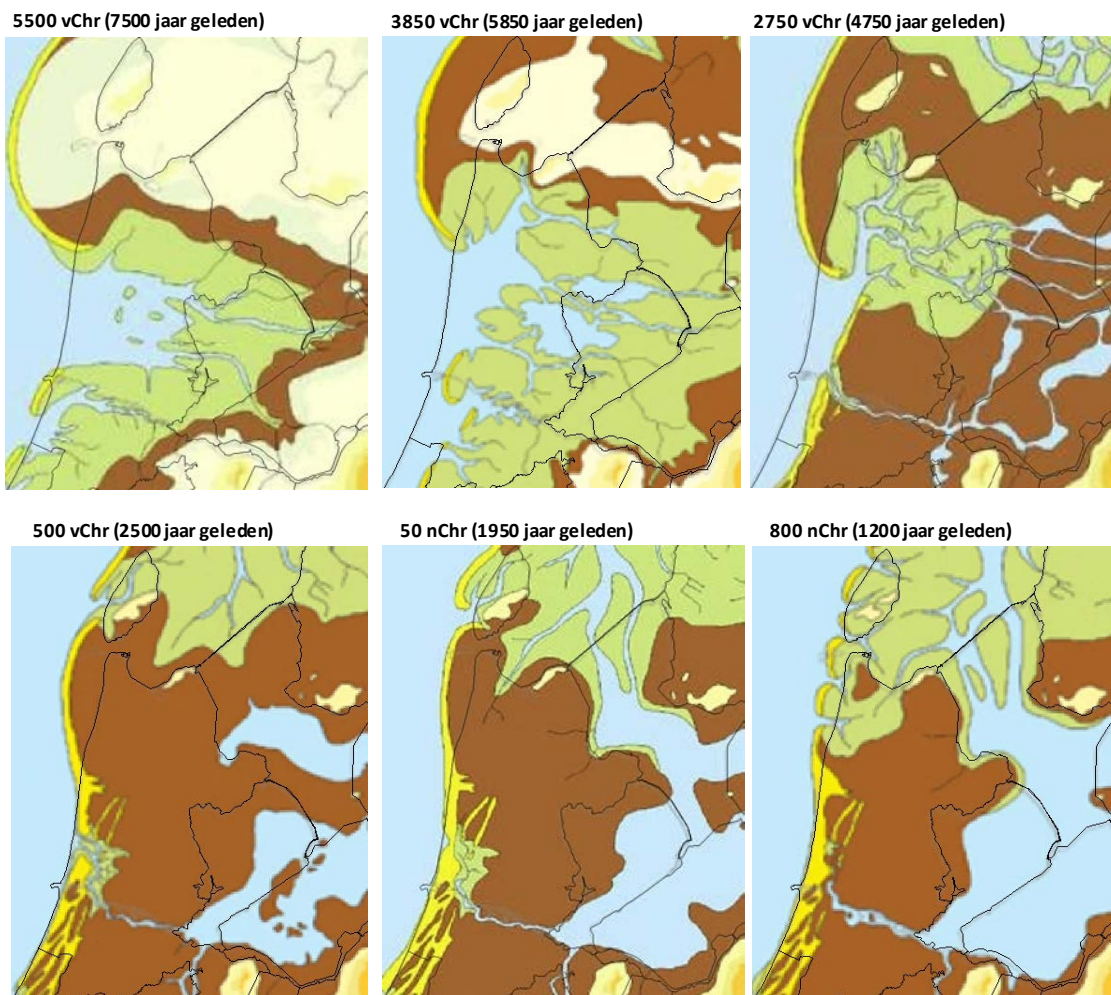
2.2.1 Ontstaansgeschiedenis beheersgebied HHNK

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de bestaande kennis over de historische ontwikkeling van Noord Holland in relatie tot het voorkomen van het zout in de ondergrond. Tot de middeleeuwen zijn de natuurlijke ontwikkelingen voor het gebied van groot belang, daarna is de ontwikkeling van het land en het voorkomen van zoet en zout water in de ondergrond sterk beïnvloed door menselijk handelen. De beschrijving in deze sectie richt zich met name op de historische ontwikkeling in het Holoceen (de periode van 10.000 jaar geleden tot aan het heden), aangezien de processen in deze periode voornamelijk van belang zijn voor het voorkomen van zout in de ondergrond in

Noord Holland (Post, 2004). In het Holoceen zijn in Noord Holland de sedimenten tot een diepte van 0-20m onder NAP afgezet. De geologische processen tijdens het Pleistoceen (de periode voor het Holoceen) waren van belang voor de vorming van de diepere lagen (zie o.a. Mulder et.al., 2003).

Holoceen

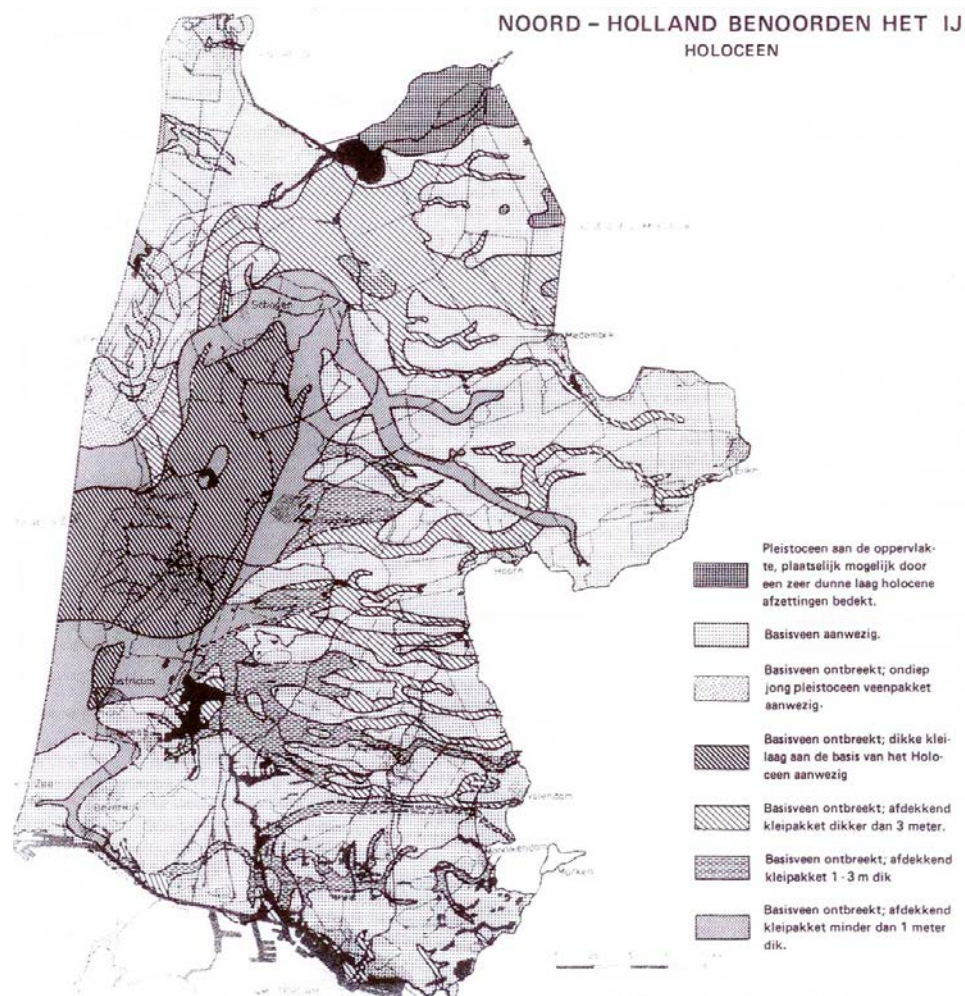
Aan het begin van het Holoceen stond het afzettingmilieu in Noord Holland onder invloed van een sterke zeespiegel- en grondwaterspiegelstijging. Er vormden zich in deze periode grote veenmoerassen in West Nederland, waarbij het zogenaamde basisveen werd afgezet. Omstreeks 7500 BP bereikte het stijgende zeewater het huidige kustgebied en vormden zich brede getijdegeulen waarin marine sedimenten werden afgezet in zuid en centraal Noord Holland. Het basisveen en de getijdenafzettingen van slecht doorlatende klei dekten het Pleistocene pakket af en voorkwamen daardoor dat het zoute water op deze plaatsen in de aquifer kon doordringen. In diepe getijden geulen was deze afdekkende laag geërodeerd en op deze plaatsen kon het zoute water wel de Pleistocene zanden binnendringen. Van hieruit verspreidde het zoute water zich vertikaal en lateraal door vrije convectie, wat een verklaring kan vormen voor de verzilting van grote gebieden onder het basisveen (Kooi et al., 1999; Post et al., 2004). Een gedetailleerde analyse hiervan voor de verschillende delen van het gebied is te vinden in paragraaf 2.4.



Figuur 2.1. Paleografische reconstructie van Nederland omstreeks (a) 7500 (b) 5800 (c) 4750 (d) 2500 (e) 1950 en (f) 1200 jaar geleden.

Rond 6000 BP nam de relatieve zeespiegelstijging geleidelijk af waardoor een verlandingsproces op gang kwam, hierbij vormden zich strandwallen langs de Nederlandse kust. In Noord Holland sloten de strandwallen zich echter niet volledig en dit gebied bleef onder invloed van de getijden via het zeegat van bergen (NOAA; Mulder et al, 2003). De getijdengeulen vulden zich met sediment dat was geërodeerd van de Noordzeebodem en van de kustboog van Texel en door landinwaarts verplaatsend sediment. Door het verschil in stroomsnelheid voor- en achterin het kwelder gebied werden de geulen in het westelijk deel van het gebied met zand en meer naar het oosten met klei gevuld, wat een belangrijke invloed heeft op de latere hydrologische eigenschappen van de bodem. Achter het zeegat van Bergen bereikte het sediment veelal niet het meest oostelijke gedeelte van het waddengebied. Het kweldergebied blijft daardoor relatief laaggelegen in het gebied dat later het IJsselmeer zal worden.

Opgemerkt moet worden dat het noordelijkste deel van Noord Holland een andere iets andere Holocene ontwikkeling heeft doorgemaakt dan de rest van het gebied. Hier bevond zich een relatief hoge Pleistocene rug, de kustboog van Texel met een hoogte van 0-3m –NAP, die zich uitstreckte tot ten westen van de huidige kustlijn. De kwelder afzettingen en de veenvorming is hier pas relatief laat in het Holoceen op gang gekomen en de dikte van het Holocene pakket is hier relatief dun. Bij het voormalige eiland Wieringen komt als een overblijfsel van de kustboog het Pleistoceen pakket nog aan het oppervlak.



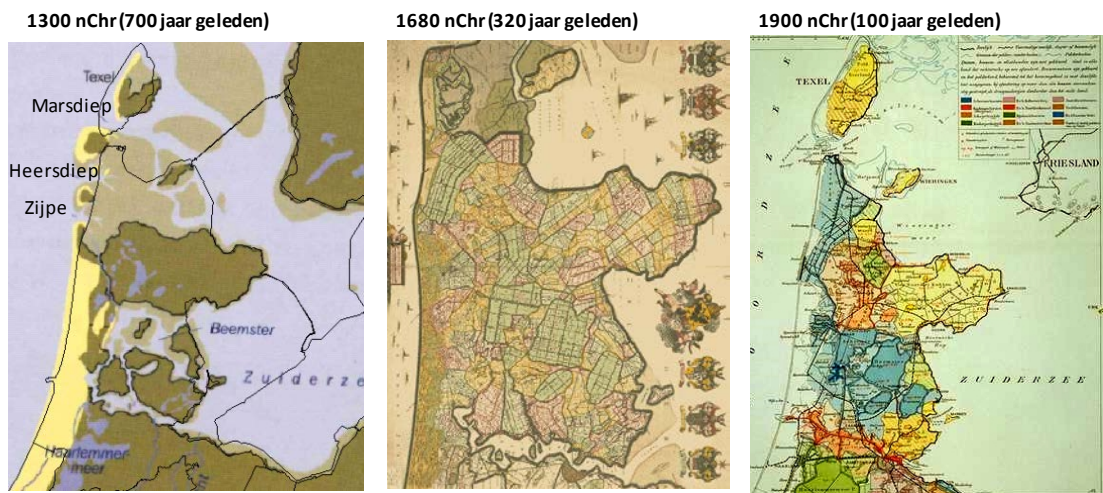
Figuur 2.2. Holocene geulenaart van Noord-Holland (de Mulder, 1979)

Rond 4400 BP komt een eind aan de landinwaartse verplaatsing van de strandwallen en tot ongeveer het begin van onze jaartelling bouwt de kust zich met ongeveer 10 km zeewaarts uit. Hierbij vormen zich nieuwe duinen ten westen van de oude standwallen. De laatste zijn overigens wel blijven bestaan als belangrijke, hoger liggende landschapselementen. Een oude strandwal is bijvoorbeeld nog zichtbaar ten westen van de Schermer als de zandrug van Alkmaar.

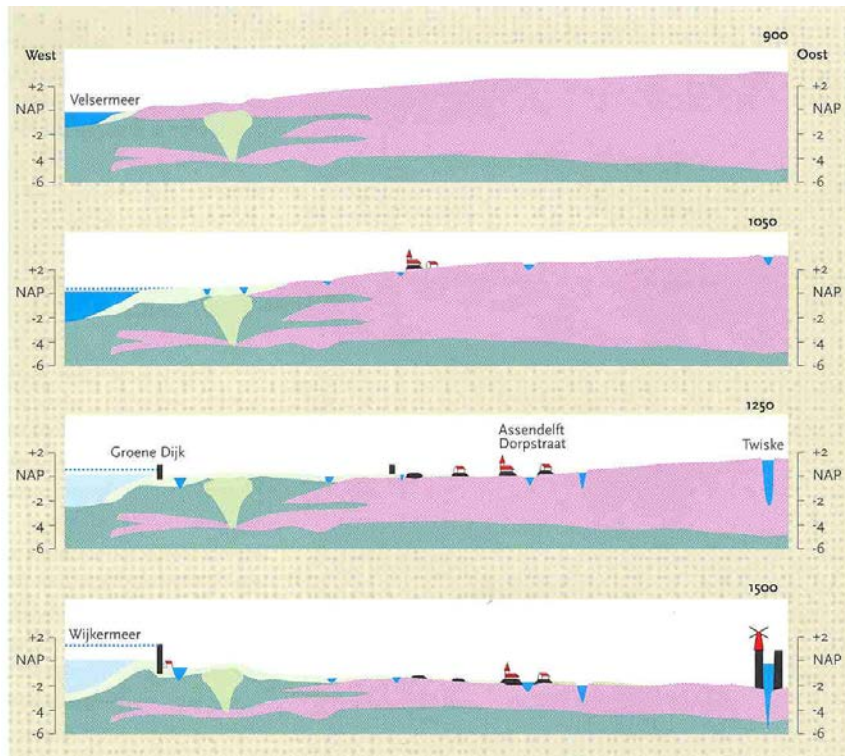
Onder de steeds sterkere afname van de zeespiegelstijging sluit uiteindelijk ook het zeegat bij Bergen zich in 3200 BP, waardoor ook in het centrale en noordelijke deel van Noord Holland de kwelder invloed verdwijnt en zich veenmoerassen vormen. Op de plaatsen die al langer niet meer onder directe invloed van de zee stonden vond deze veenvorming al langer plaats. In eerste instantie is dit laagveen, en naarmate dit hoger wordt verandert het in hoogveen. Uiteindelijk groeit het veen boven zeeniveau uit en ontstaan hoogveenkussens tot ongeveer 3m +NAP (Mulder et al., 2003). Hieruit kan geconcludeerd worden dat het veen op zijn minst deels in een zoet milieu moet zijn gevormd. Ook moet het water dat is vastgehouden tijdens de vorming van het bovenste deel van het veen zoet zijn. Het laagveen kan namelijk eventueel in een zout milieu gevormd zijn, zeker op plaatsen nabij de toenmalige zee waar zout water omhoog kon kwellen. Hoogveen wordt echter gevoed door regenwater en is dus inherent zoet.

Periode vanaf de Middeleeuwen

Tot ongeveer 900 AD (~1100 BP) vormt de duinenrij een aaneengesloten natuurlijke barrière. Dit verandert echter als rond 1000 AD een aantal grote doorbraken in de duinenrij plaatsvinden. De belangrijkste zijn de doorbraak van Zijpe, de doorbraak van Heersdiep en de doorbraak van Marsdiep. De eerste twee worden op termijn gedicht, maar de doorbraak van Marsdiep heeft grote invloed op het Noord Hollandse landschap. Hierdoor komt het eerder zoete meer ten oosten van Noord Holland, in open verbinding te staan met de Noordzee en vormt zich de Zuiderzee. Ook worden er grote stukken veen weggeslagen in het noorden van de provincie. De ontwatering aan de oostkant van Noord Holland naar het noorden neemt hierdoor ook toe.



Figuur 2.3 (a) Situatie rond 1300 met de dan gerealiseerde omdijkingen en de doorbraken van Zijpe, Heersdiep en Marsdiep. (Mulder, et.al. 2003), (b) Situatie rond 1700 met de dan gerealiseerde droogmakerijen en (c) Situatie rond 1900 met gekanaliseerd IJ.

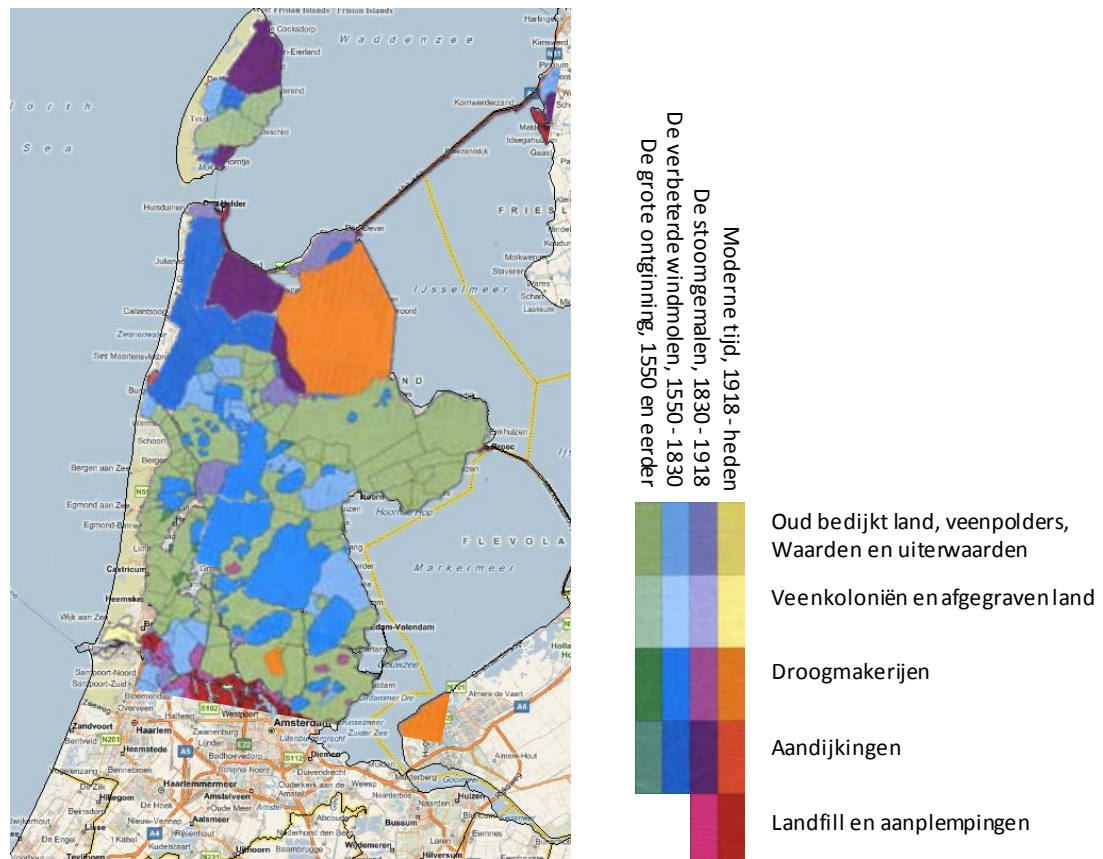


Figuur 2.4. Proces van bodemdaling door ontginning en ontwatering van West Nederland sinds de Middeleeuwen.

In deze periode vanaf ongeveer 900 AD neemt de menselijke invloed op het gebied sterk toe. Het veen wordt ontwaterd voor de ontginning voor landbouw en afgestoken voor turfwinning. Door de verbeterde ontwatering begint het onomkeerbare proces van inklinking. Het veen dat rond 900 AD nog ongeveer 3m boven zeeniveau lag is rond de 15^e eeuw al ingeklonken tot op zeeniveau. De bodemdaling zorgt voor wateroverlast en er worden kades en sluisjes aangelegd om het water af te voeren. In de 12^e eeuw worden veel dijken aangelegd, die het land moeten beschermen tegen het steeds verder afkalven van het veen en de plasvorming die op grote schaal plaatsvindt. Zo is bijvoorbeeld Westfriesland ingepolderd en daar is het land behouden gebleven. Ten zuiden daarvan vormden zich echter grote meren, in open verbinding met de Zuiderzee, zoals de Schermer en Beemster.

Aan het eind van de middeleeuwen wordt een begin gemaakt met de grootschalige terugwinning van de ondergelopen gebieden. Hierbij kunnen twee soorten polders worden onderscheiden:

1. Land dat eerst boven zeeniveau lag maar door ontwatering is ingeklonken tot onder zeeniveau en daarom ontwaterd moet worden. Dit behelst voornamelijk de gebieden die vroeg bedijkt zijn.
2. Diepe droogmakerijen van gebieden die oorspronkelijke meren waren of tot de zee behoorden. De Schermer en de Wieringermeer zijn beide voorbeelden van een dergelijke diepe droogmakerijen.



Figuur 2.5. Inpolderingsgeschiedenis van Noord Holland, waarbij de ouderdom en de methode van inpoldering is weergegeven (Geuze et.al., 2009)

De eerste categorie polders wordt het vroegste ontgonnen zijn, in de 13e eeuw worden de eerste kleine plassen bedijkt en in de 15e eeuw wordt uit grotere polders het overtollige water weggepompt. Al die polders loosden hun water op de grote binnenmeren, de Beemster, Schermer, Wijde Wormer, Purmer enzovoort. Die meren stonden weer in open verbinding met de zee. Het water kon dus zonder problemen weglopen.

Met de verbeteringen van de technieken om water met windmolens weg te pompen komt in de 16^e eeuw de ontginning van de tweede categorie polders, de grote droogmakerijen, op gang. Hierbij worden de grote meren leeggepompt, bijvoorbeeld in de 17^e eeuw de Schermer en de Beemster. Deze ontwikkelingen brengen grote veranderingen in de grondwaterstroming, waarbij de verlaging van het waterpeil in de polders water uit de nabijgelegen hogere gebieden aantrekt, veelal als zoete kwel. Ook zout wat zich dieper in de ondergrond bevindt wordt door de bemalingen naar het oppervlak getrokken. De Wieringermeer, die in 1930 is drooggelegd, is een van de laatst ingepolderde gebieden van Noord Holland.

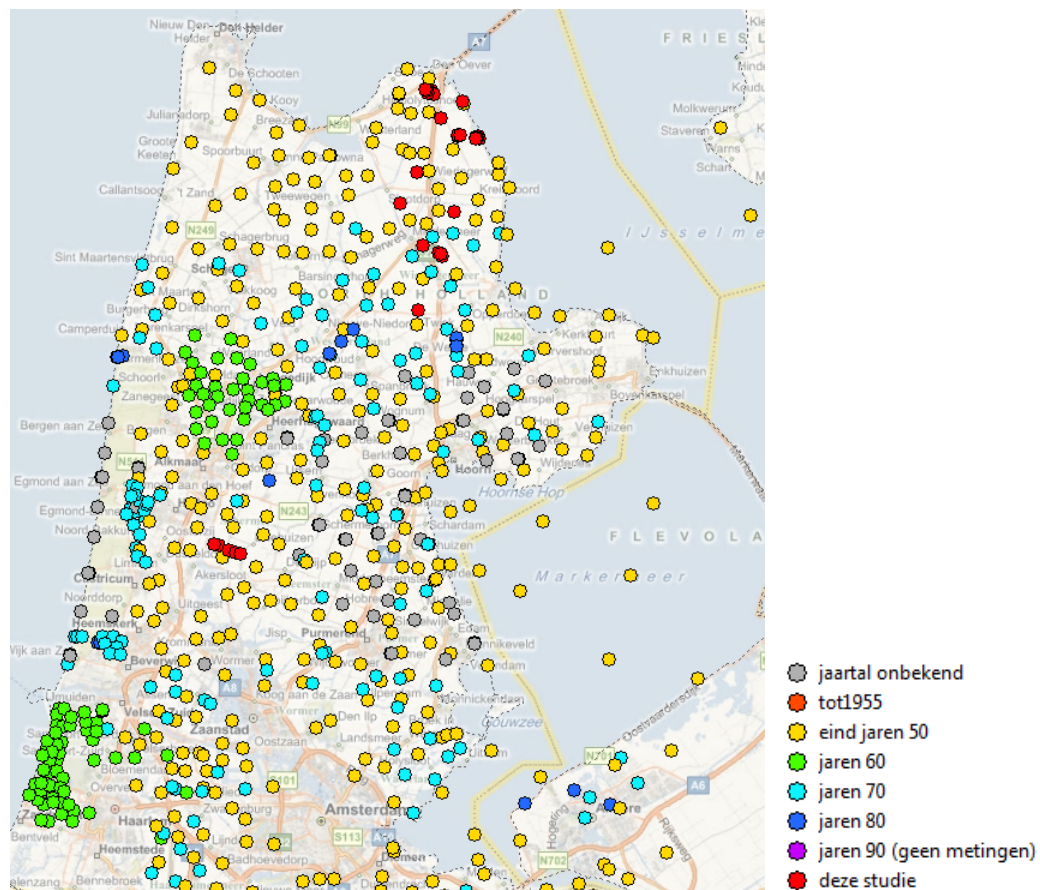
2.3 Kartering van de zoet-zout verdeling van het grondwater

2.3.1 Aanpak

Aan de hand van puntwaarnemingen van chloridemetingen is het vrijwel onmogelijk een betrouwbare 3D chlorideverdeling te verkrijgen (zie paragraaf 2.5.2). Daarom is gekozen voor een benadering dat uitgaat van grensvlakken, dat zijn vlakken met hetzelfde zoutgehalte. Door gebruik te maken van grensvlakken wordt een veel geleidelijker verloop verkregen en zijn de resultaten makkelijker te interpreteren.

Voor het ontwikkelen van grensvlakken is gebruik gemaakt van de bodemopbouw in combinatie met bestaande VES metingen aangevuld met CVES, TDEM en VES metingen uitgevoerd in deze studie. Over wat elke meetmethode doet en wat de toepassingsbereik is wordt verwezen naar hoofdstuk 3. In het kort komt het er op neer dat met elk van deze methoden een zogenaamde formatieweerstand wordt gemeten. De formatieweerstand is de weerstand van de bodem samen met het poriewater. De weerstand van het poriewater (de reciproque van de geleidbaarheid) is via de zogenaamde formatiefactor gerelateerd aan de formatieweerstand. De weerstand van het poriewater is middels een empirische relatie te vertalen naar een chlorideconcentratie (Acacia Water, 2008).

De hier toegepaste methode voor het ontwikkelen van grensvlakken is niet nieuw. De methode is bijvoorbeeld al toegepast bij de interpretatie van VES metingen uitgevoerd in de jaren 50 (voor Noord-Holland, Dijkstra en Volker, 1962 en voor het IJsselmeer, Volker, 1957). In deze studies heeft dit geresulteerd in een beeld van formatieweerstanden op verschillende diepte intervallen en één grensvlak. Dezelfde benadering heeft ook recenter tot goede resultaten geleid (Acacia Water, 2008 en Deltares, et.al. 2008). Het verschil met eerdere studies was dat meerdere grensvlakken van oplopende chloridegehalten zijn ontwikkeld.



Figuur 2.6. VES metingen gebruikt voor het ontwikkelen van grensvlakken van gelijke zoutgehalten. De rode punten geven de metingen aan die in het kader van dit onderzoek zijn uitgevoerd (Schermer en Wieringermeerpolder).

Figuur 2.6 geeft een overzicht van de gebruikte VES metingen. Het betreft alle metingen die beschikbaar zijn uit het DINO Loket (in totaal 843) aangevuld met metingen uit het IJsselmeeronderzoek (in totaal 44, Volker (1957)) en metingen uitgevoerd binnen deze studie (in totaal 17). De metingen uit het IJsselmeer onderzoek waren uitsluitend analog beschikbaar en zijn binnen deze studie gedigitaliseerd. Daarbij wordt opgemerkt dat de

metingen van het IJsselmeer onderzoek zijn uitgevoerd met de Wenner methode en zijn geïnterpreteerd met een 3 lagen model. Dit resulteert in een grotere foutenmarge voor wat betreft overgangen. Ook zijn met deze methode dunne lagen met een afwijken weerstand niet te zien. In totaal zijn er 904 (C)VES metingen gebruikt.

De formatieweerstand geeft de weerstand weer van de ondergrond en het poriewater. In algemeen geldt dat een lage weerstand overeenkomt met ofwel klei/veen, zout/brak poriewater of een combinatie. Een hoge weerstand komt overeen met zand, zoet water of een combinatie. Zand met zout poriewater geeft dus een lagere weerstand dan zand met zoet water. Zoetwater houdend klei en veen heeft een formatieweerstand van ca 10 – 20 Ohmm. Een weerstand dat overeenkomt met brak water in zand. Om een duidelijk verschil tussen zoet en brak grondwater te kunnen maken is bij de keuze van de waarden per grensvlak het bereik van klei en veen uitgesloten. Met dit uitsluitel als uitgangspunt zijn de volgende drie grensvlakken onderscheiden. Een grensvlak waaronder de formatieweerstand kleiner is dan 2.5 Ohmm, kleiner is dan 5 Ohmm en een grensvlak waarbij de formatieweerstand 20 Ohmm of groter is. Deze waarden komen in onze interpretatie overeen met respectievelijk, 10000 mg/l, 5000 mg/l en 1000 mg/l. Daarnaast komen in sommige gebieden zogenaamde inversie voor (zout water op zoet water). Deze zijn, voor zover mogelijk, afzonderlijk in kaart gebracht.

Tabel 2.1 geeft een overzicht en vertaling van de drie grensvlakken van formatieweerstand naar chlorideconcentratie. In de studie van Dijkstra en Volker (1959) is op vergelijkbare manier een vertaling van formatieweerstand naar chlorideconcentratie gemaakt. In deze studie is op basis van gemeten chlorideconcentraties van watermonsters een formatiefactor bepaald waarmee de formatieweerstand naar een geleidbaarheid van het poriewater wordt vertaald. Voor de temperatuurcorrectie namen zij een vaste waarde van de ondergrond aan van 10°C. Een redelijke aanname die in deze studie is overgenomen. In de laatste stap is gebruik gemaakt van een relatie tussen de geleidbaarheid en chloridegehalte van Post (2008).

Tabel 2.1. Overzicht van vertaling van formatieweerstand naar chloridegehalte voor de drie grensvlakken.

| Bodem met poriewater Ohmm (totaal) | Formatiefactor | Water | | Temperatuur correctie | | Chloridebepaling | |
|---------------------------------------|----------------|-------|-------|-----------------------|-------|------------------|-----------------|
| | | Ohmm | uS/cm | T (Celcius) | uS/cm | HCO3 | Chloride (mg/l) |
| 1.5 | 4.5 | 0.33 | 30000 | 10 | 39474 | 500 | 16888 |
| 2 | 4.5 | 0.44 | 22500 | 10 | 29605 | 500 | 11941 |
| 2.3 | 4.5 | 0.51 | 19565 | 10 | 25744 | 500 | 10156 |
| 2.5 | 4.5 | 0.56 | 18000 | 10 | 23684 | 500 | 9232 |
| 4 | 4.5 | 0.89 | 11250 | 10 | 14803 | 500 | 5449 |
| 4.3 | 4.5 | 0.96 | 10465 | 10 | 13770 | 500 | 5028 |
| 5 | 4.5 | 1.11 | 9000 | 10 | 11842 | 500 | 4251 |
| 10 | 4.5 | 2.22 | 4500 | 10 | 5921 | 500 | 1937 |
| 17 | 4.5 | 3.78 | 2647 | 10 | 3483 | 500 | 1013 |
| 20 | 4.5 | 4.44 | 2250 | 10 | 2961 | 500 | 818 |
| 35 | 4.5 | 7.78 | 1286 | 10 | 1692 | 500 | 345 |

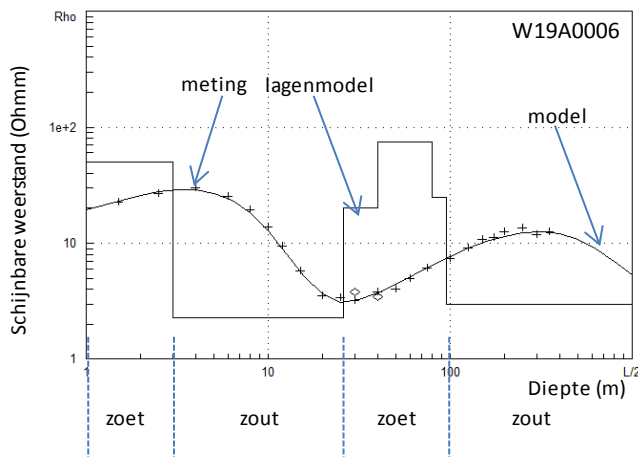
De basis voor alle grensvlakken vormt het grensvlak van 5 Ohmm omdat deze goed te onderscheiden is en in vrijwel alle VES metingen aanwezig is. Volgens bovenstaande tabel komt een waarde van 5 Ohmm overeen met een chlorideconcentratie van 4251 mg/l. Echter vanwege onzekerheden bij de interpretatie van de VES metingen en vertaalslag naar chlorideconcentraties is een waarde van 5 Ohmm als bovengrens aangehouden voor de bepaling van het grensvlak van 5000 mg/l.

Hetzelfde geldt voor het tweede grensvlak. In gebieden met lage chlorideconcentraties heeft een verzadigde zandlaag een formatieweerstand van ongeveer 20 Ohmm. Een waarde die volgens de tabel overeenkomt met een chlorideconcentratie van 818 mg/l.

Vanwege dezelfde onzekerheden is aangenomen dat een formatieweerstand van 20 Ohmm overeenkomt met 1000 mg/l.

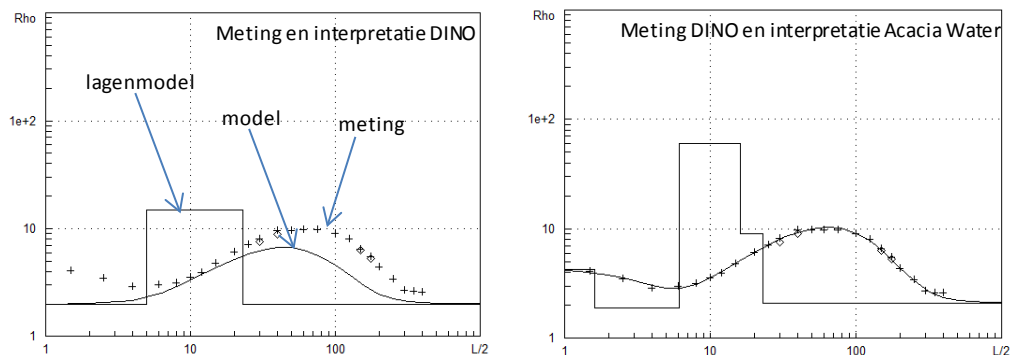
Het derde grensvlak komt overeen met een chlorideconcentratie van 10000 mg/l waarbij uitgegaan is van een formatieweerstand van 2.5 Ohmm. Dit grensvlak ligt vaak diep en is niet in alle metingen aangetroffen. In die gevallen is gekeken of er een chloridemeting uit een peilbuis in de buurt is, maar ook die zijn beperkt aanwezig. Om een gebiedsdekkend beeld te krijgen is in enkele gevallen een aanname gedaan dat het grensvlak van 10000 mg/l 30m onder het 5000 mg/l grensvlak ligt. De aanname van 30m is gebaseerd op het verloop van chloride met de diepte zoals dat is aangetroffen in enkele peilbuizen en boorgatmetingen.

In Noord-Holland is op verschillende plaatsen sprake van een zogenaamde inversie. Het normale beeld in Nederland is een geleidelijke toename van het zoutgehalte met de diepte. In sommige gevallen echter vinden we een zoute laag op een zoete laag. In dat geval spreken we van een inversie. Het vaststellen van een inversie is niet geautomatiseerd vast te stellen en vergt een handmatige interpretatie van de metingen.



Figuur 2.7. Voorbeeld van een inversie in een VES-meting (meting ten zuiden van Bergen).

Een voorbeeld van een meting met een inversie is gegeven in figuur 2.7 en illustreert ook hoe een geïnterpreteerde meting er uit ziet. Vanaf het maaiveld tot een circa 3 meter diepte is sprake van zoet water (waarschijnlijk een neerslaglens). Vanaf die diepte tot 28m is het water brak (weerstand van 2 Ohmm). Daarna is het water weer zoet tot in ieder geval 100m diepte waarna het weer zout wordt.



Figuur 2.8. Links de meting en interpretatie zoals opgeslagen in het DINO Loket. En rechts de opnieuw geïnterpreteerde meting waarbij het model een goede fit geeft met de meetpunten. Het betreft hier overigens meting W14B0005. Opgemerkt dat het in dit geval geen gevolgen had voor de diepteligging van de grensvlakken.

Voor het vaststellen van de grensvlakken is in eerste instantie uitgegaan van de interpretatie van de metingen zoals die zijn opgeslagen bij de metingen in het DINO Loket en de IJsselmeerstudie (Volker, 1957). Gezien de grote hoeveelheid gegevens is door Acacia Water software ontwikkeld om VES metingen in een databank in te lezen. Vervolgens is ook de dieptebepaling van elk grensvlak voor iedere meting geautomatiseerd. De resulterende dataset voor elk grensvlak is in geïnterpoleerd met 'Inverse Distance' interpolatie methode.

Dit eerste beeld bevat nog onregelmatigheden in individuele meetpunten en het verloop van de grensvlakken. Onregelmatigheden van individuele meetpunten worden veroorzaakt door fouten in interpretatie van de VES metingen, ontbreken van meetpunten in bepaalde gebieden, etc. Onregelmatigheden in het verloop van de grensvlakken is een combinatie van de interpolatiemethode, individuele meetpunten en 'witte vlekken' (ontbreken van gegevens).

De eerste stap voor de verbetering van het eerste beeld is controle en eventueel verbetering van individuele VES metingen. Daartoe is elke individuele meting gecontroleerd. In sommige gevallen is besloten een meting niet meer te gebruiken, bijvoorbeeld bij een slechte kwaliteit meting. In andere gevallen was de meting wel van goede kwaliteit maar de interpretatie slecht en is de meting opnieuw geïnterpreteerd. Figuur 2.8 geeft hiervan een voorbeeld. Op basis van deze analyse is het aantal meetpunten 905 teruggebracht tot 805. Het betreft 100 meetpunten die zijn afgefallen uit het DINO Loket.

2.3.2 Verificatie en verbetering met chloridemetingen

Op basis van chloridemetingen is een controle uitgevoerd naar de juistheid van de verkregen ligging van grensvlakken op basis van de VES metingen. De analyses zijn afkomstig uit het DINO-Loket, databank van de Provincie Noord-Holland en databank van Waternet. In totaal betreft het 8374 waarvan er 3028 buiten het aandachtgebied vallen. Er zijn dus 5346 meetpunten gebruikt voor de verificatie en verbetering van de grensvlakken kaarten.

| Interval meetjaren | Aantal metingen |
|--------------------|-----------------|
| voor 1920 | 540 |
| 1920 - 1930 | 168 |
| 1930 - 1940 | 43 |
| 1940 - 1950 | 87 |
| 1950 - 1960 | 277 |
| 1960 - 1970 | 216 |
| 1970 - 1980 | 1443 |
| 1980 - 1990 | 1351 |
| 1990 - 2000 | 675 |
| 2000 - 2010 | 546 |
| Totaal | 5346 |

Voor elk filter is de meest recente waarde gebruikt. Onderstaande tabel toont een overzicht van de periode waarin de laatste meting beschikbaar is. Opvallend is de hoeveelheid metingen in de periode 1900 tot 1930. Deze metingen zijn met de nodige voorzichtigheid betracht aangezien in die periode nog sprake was van een Zuiderzee en brakwater invloeden binnen het beheersgebied. Hierdoor kan ter plaatse van de meting

de concentratie zijn veranderd. Voor de doelstelling, het verifiëren van de grensvlakkenkaarten, bleek het wel of niet meenemen van de metingen niet of nauwelijks van invloed. Er is daarom besloten de metingen wel te gebruiken maar rekening te houden met de periode waarin gemeten is.

De zout-zout verdeling is een 3D verdeling in de ondergrond. Van belang is daarom ook inzicht te hebben in het dieptebereik van de metingen. Vanaf 100m beneden NAP neemt het aantal beschikbare filters snel af. Het diepst gelegen grensvlak van 10.000mg/l ligt, met uitzondering van het IJsselmeer, over het algemeen boven de -100m +NAP. De hoogste chlorideconcentraties op grote diepte is overigens ca 16.000 mg/l een waarde vergelijkbaar met de huidige Waddenzee. Ter vergelijking in de Noordzee ligt de waarde boven de 18.000 mg/l. Dit is van belang voor de interpolatie naar de grotere diepten waarvoor een waarde van 16.000 mg/l is aangenomen. Onderstaande tabel geeft tenslotte voor de verschillende chlorideconcentraties de beschikbare metingen.

| Interval filterdiepte (m +NAP) | Aantal filters | Interval chloride (mg/l) | Aantal metingen |
|--------------------------------|----------------|--------------------------|-----------------|
| > 0 | 93 | < 500 | 2892 |
| 0 tot -10 | 971 | 500 - 1000 | 453 |
| -10 tot -25 | 1389 | 1000 - 5000 | 1264 |
| -25 tot -50 | 1415 | 5000 - 10000 | 348 |
| -50 tot -100 | 1026 | 10000 - 15000 | 270 |
| -100 tot -200 | 404 | > 15000 | 119 |
| -200 tot -300 | 34 | | |
| <-300 | 14 | | |
| Totaal | 5346 | Totaal | 5346 |

Bij de verificatie is rekening gehouden met aantal onzekerheden te weten:

1. Dieptebepaling zout-zout overgangen met een VES meting
2. Omrekening van een gemeten formatieweerstand naar een chlorideconcentratie
3. Toegepaste interpolatie van meetpunten naar een vlakdekkende kaart

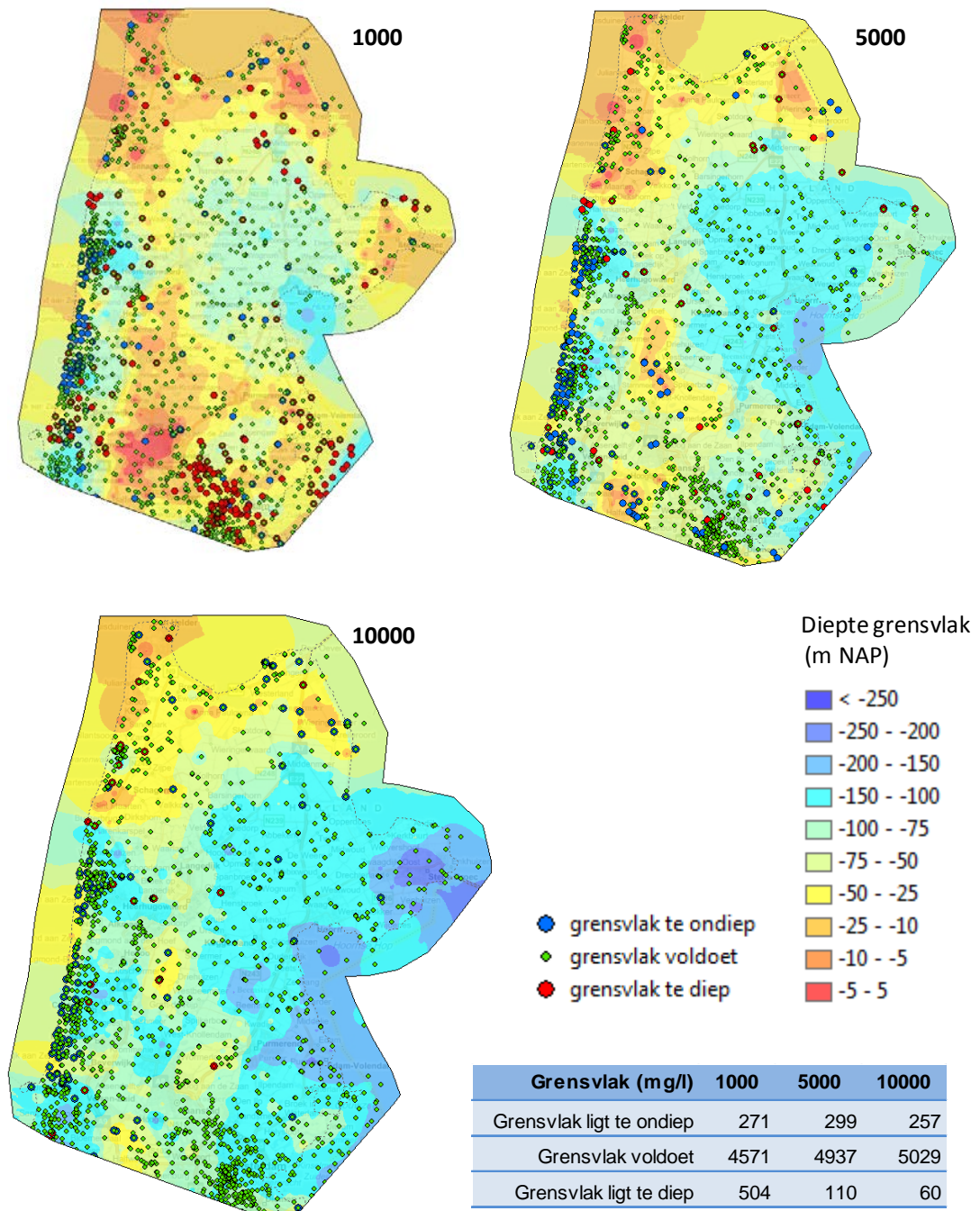
Op basis van deze onzekerheden is een marge gedefinieerd van 5m boven en onder het grensvlak en 500 mg/l boven en onder de waarde van het betreffende grensvlak. In de praktijk betekent dit voor bijvoorbeeld het 5000 mg/l grensvlak dat een gemeten chloridegehalte van 5200mg/l met een filter 2m beneden het geïnterpoleerde grensvlak binnen de marge valt.

De verificatie is uitgevoerd door voor elk meetpunt van chloride vast te stellen of het filter zich boven of onder het grensvlak bevindt. Vervolgens is voor elk filter vastgesteld of de gemeten concentratie groter dan wel kleiner is dan de waarde van het grensvlak. Dit levert uiteindelijk 3 klassen op. Een klasse waarbij hogere concentraties dan de grensvlakwaarde onder het grensvlak liggen en lagere concentraties dan de grensvlakwaarde boven het grensvlak liggen. In deze punten voldoet het grensvlak. In de andere twee klassen ligt het grensvlak dan wel te diep of te ondiep in vergelijking tot de gemeten chlorideconcentratie.

2.3.3 Resultaten kartering

Met behulp van de chlorideconcentraties zijn de grensvlakkenkaarten gecontroleerd op juistheid en waar nodig zijn aanpassingen verricht. Dit kan zijn dat een VES meting opnieuw is geïnterpreteerd, maar ook dat kennis van het hydrologische systeem is

toegevoegd in de vorm van hulplijnen en punten. Over het algemeen komen grensvlakken goed overeen met de chloridemetingen. Deze paragraaf beperkt zich daarom tot de belangrijkste afwijkingen en aanpassingen die hebben geleid tot de definitieve versie van de grensvlakken.



Figuur 2.9. Resultaten verificatie grensvlakken op basis van chloridemetingen.

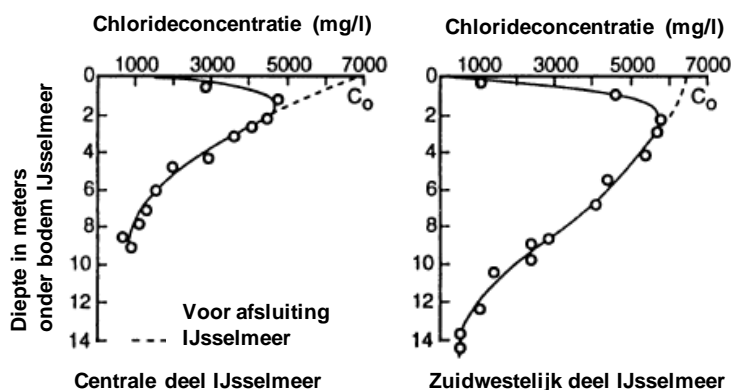
Figuur 2.9 geeft de resultaten van de verificatie weer. Per grensvlak is in een kaart met daarop voor iedere chloridemeting aangegeven of het grensvlak overeenkomt met de meetgegeven van chloride. De tabel vat de verificatie samen.

Grensvlak 1000 mg/l

Het grensvlak 1000 mg/l komt goed overeen met de chloridemetingen. Er zijn diverse aanpassingen en herinterpretaties van de VES metingen nodig geweest om tot dit beeld te komen. Dit heeft te maken met de doelstelling van de oorspronkelijke VES metingen, waarbij minder aandacht was voor het ondiepere bereik. Verder komt een chloridewaarde van 1000 mg/l overeen met formatieweerstanden die ook voor klei en zandige klei kunnen gelden. Voor de bepaling van het grensvlak is dan ook veelvuldig gecontroleerd met de bodemopbouw.

Het 1000 mg/l grensvlak ligt volgens de verificatie in een paar gebieden te diep. Het meest in het oog springt de Wieringermeerpolder. De hogere chloridewaarden hebben hier te maken met de inversie (zout water op zoet water) die hier aanwezig is. De interpretatie uit de VES-metingen klopt. De gemeten chloridegehalten hebben betrekking op de inversie. Hetzelfde geldt voor de puntenwolk bij Petten aan de kust en de punten bij Alkmaar en Heerhugowaard. Ook hier is sprake van een inversie. Boven Amsterdam tot Zaanstad ligt het grensvlak te diep. De variatie in de meetwaarden is echter groot en varieert tussen de 500 mg/l en 2000 mg/l. Voor nu is de huidige begrenzing aangehouden wat bij de toepassing van het grondwatermodel in een onderschatting van de zoutbelasting kan resulteren.

Bij Volendam valt op dat de metingen op het land goed overeenkomen maar de metingen in het IJsselmeer niet. Dit heeft vermoedelijk te maken met een inversie die bij Volendam zelf is aangetoond. De inversie wordt in het IJsselmeer vermoedelijk niet gezien vanwege de daar toegepaste Wennermethode en interpretatie. Figuur 2.10 geeft een grafiek van het chloridegehalte met de diepte in het IJsselmeer. Dit is een situatie die een groot deel van het IJsselmeer wordt aangetroffen. De beschikbare VES metingen zijn echter beperkt om een eenduidig beeld te maken. Daarom is in deze studie uitgegaan van de resultaten uit de metingen ook als dit betekent dat wanneer een inversie wordt vermoed deze dan niet is opgenomen in de inversiekaart.



Figuur 2.10. Chlorideverloop onder het IJsselmeer. De grafieken tonen de inversie van een dunne brakke laag op zoet grondwater. (naar Volker, 1961 en de Vries, 1996)

Bij Enkhuizen is een steile overgang van een ondiepe naar diepe ligging van het grensvlak. Door de interpolatie komen de meetpunten niet helemaal overeen met de geïnterpoleerde waarde van het grensvlak. Er is hier sprake van een complexe afwisseling van zoet en zout die niet makkelijk te vangen is in de grensvlakbenadering. Volgens Pomper (1981) is hier sprake van een inversielaag aan het oppervlak (zie Figuur 2.11).

In het duingebied zijn veel meetpunten van chloride. In de kaart is te zien dat het met VES metingen bepaalde grensvlak in vergelijking tot de chloridemetingen in een sonde langs de kust te ondiep ligt. Dat heeft hier te maken de beperkte beschikbaarheid van

VES metingen in het duingebied. De VES metingen buiten de duinen domineren daardoor de interpolatie van het grensvlak. Hierdoor wordt de dikte van de zoetwaterlens onder de duinen onderschat.

Grensvlak 5000 mg/l

Het meest in het oog springt de Wieringermeerpolder. Voor een deel zijn de afwijkingen te verklaren door de inversie (zout water op zoet water) die hier aanwezig is. De zoete laag begint daaronder waardoor het regionale grensvlak dieper ligt hetgeen ook bevestigd is uit chloridemetingen. Voor de puntenwolk bij Petten aan de kust, de punten bij Alkmaar en Heerhugowaard en het gebied bij Volendam is ook sprake van een inversie.

In het noordoostelijk deel van de Wieringermeerpolder is de diepte van het grensvlak onderschat. Dit komt door de beperkte aanwezigheid van meetpunten waardoor in combinatie met interpolatie een wat dieper gelegen grensvlak het gevolg is. Het omgekeerde effect is aanwezig voor enkele punten in het IJsselmeer waar door dezelfde oorzaak juist een wat te diep grensvlak is. De afwijking in diepteligging ligt in de orde van 5m – 10m.

In de Zuid-Schermer ligt het grensvlak in vergelijking tot de chloridemetingen te ondiep. Dit komt door de scherpe overgang van zoet naar zout. Ook te ondiep is het grensvlak in de zone van het duingebied. Hiervoor geldt dezelfde reden zoals beschreven onder het 1000 mg/l grensvlak. Ook in een gebiedje bij Halfweg ligt het grensvlak te ondiep. Dit is een lastig gebied met sterk variërende chlorideconcentraties met de diepte.

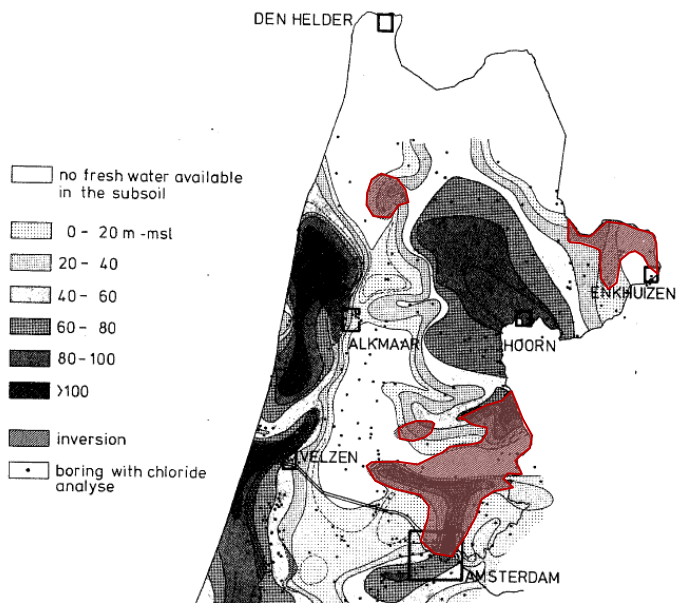
Grensvlak 10000 mg/l

Binnen de Wieringermeerpolder ligt het grensvlak te ondiep. Volgens de VES metingen is hier sprake van een scherpe overgang. Het grensvlak ligt tegen het 5000 mg/l grensvlak aan. In het overig deel van het beheersgebied komen de metingen goed overeen. Maar wat voor de andere grensvlakken geldt is ook voor het duingebied geval (zie grensvlak 1000 mg/l).

Inversie

Eerder is al aangegeven dat in delen van het gebied sprake is van een inversie en dat het vaststellen van een inversie niet geautomatiseerd is vast te stellen. De combinatie van brak water met de bodem geeft een weerstand in de VES meting die lijkt op de waarde van klei en veen. Over het algemeen liggen de inversie ondiep. Een ondiep gelegen lage weerstandslaag in een VES meting kan daarom duiden op zowel brak grondwater (een inversie) als een zoete deklaag met klei en veen. Om te komen tot een kaart met inversies is daarom direct gewerkt met de combinatie van VES metingen en chloride-metingen. De eerste stap hierbij was een inversiekaart te maken uitsluitend gebaseerd op VES metingen en deze vervolgens aan te passen aan de hand van de chloridemetingen.

In het verleden is al aandacht geweest in de voorkomens van inversies in West Nederland. In de studie van Pomper (1981) zijn de metingen van o.a. de Wit (1980) samengevat. Het gaat hier om metingen, of beter gezegd, grensvlak van 200 mg/l. In het artikel wordt aangegeven dat hiernaar aanvullende studie is en feitelijk een eerste aanzet. Dit verklaard meteen ook het verschil met de inversiekaart die in deze studie is samengesteld (Figuur 2.12). Bij de interpretatie van de inversies is uitgegaan van een hogere waarde omdat een lage concentratie van 200mg/l in een VES meting niet te onderscheiden is.



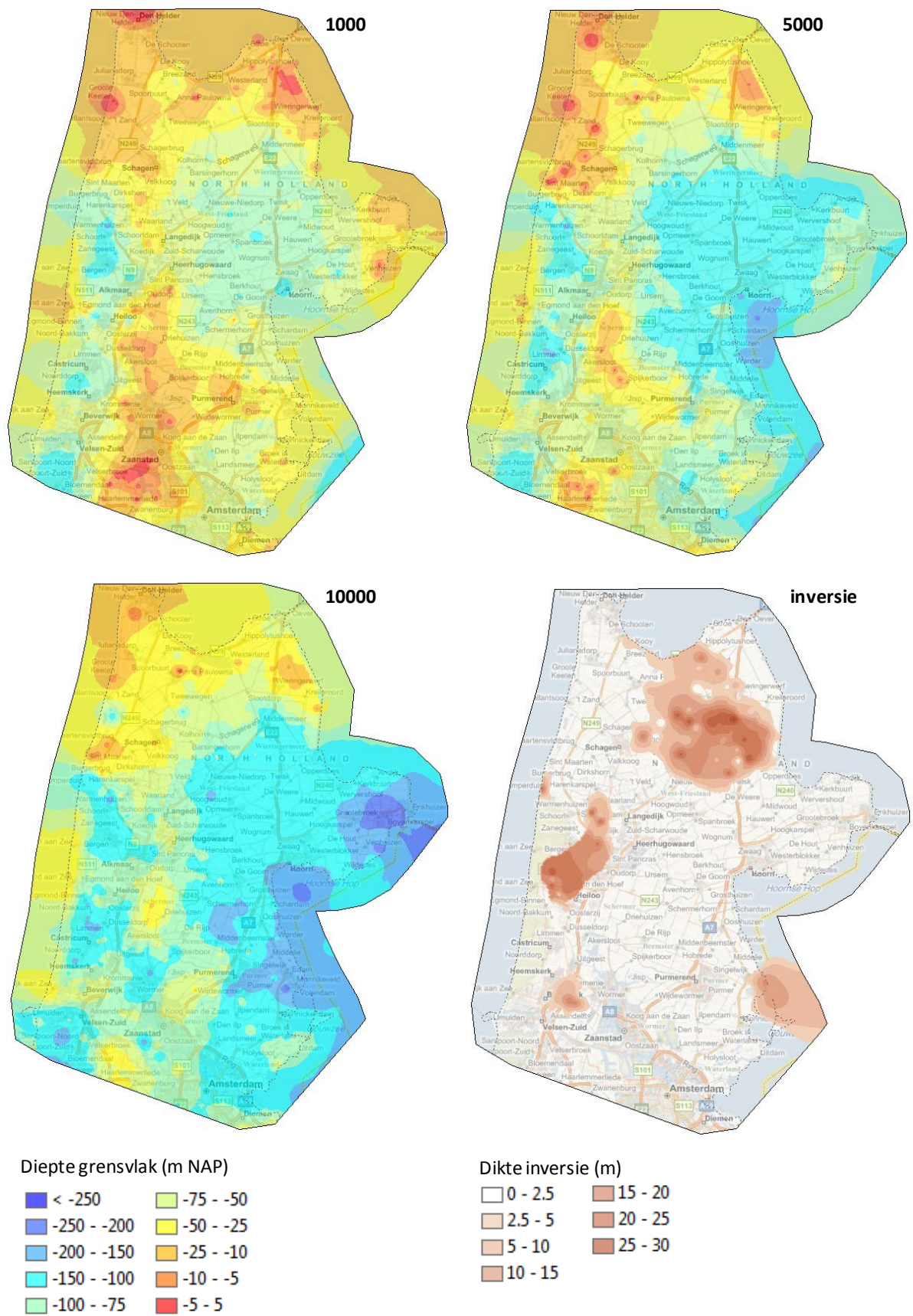
Figuur 2.11. Diepte 500 mg/l grensvlak op basis van chloridemetingen en het voorkomen van inversies op basis van 200 mg/l (aangepast naar Pomper, 1981).

De duidelijkst herkenbare inversie is in de Wieringermeerpolder. In het centrale deel heeft het een dikte van maximaal 25m en in het centrale deel een chloridegehalte van 5000 mg/l oplopend tot 10000 mg/l. Het chloridegehalte neemt af naar de randen tot waarden van 500 mg/l een dikte van enkele meters. Opvallend verschijnsel is dat aan de randen van de inversie de inversie uitsluitend aanwezig is in de onderkant van de deklaag.

Tenslotte is er de eerder al benoemde inversie rond Volendam. Deze inversie is vastgesteld op basis van VES metingen op het land waar gedetailleerdere informatie uit is af te leiden. De VES metingen uitgevoerd op het IJsselmeer maken het onderscheiden van een inversie niet altijd mogelijk. Eerder is al onderbouwd dat de inversie in een groot deel van het IJsselmeer wordt aangetroffen. De beschikbare VES metingen zijn echter beperkt om een eenduidig beeld te maken. Daarom is in deze studie uitgegaan van de resultaten uit de metingen ook als dit betekent dat wanneer een inversie wordt vermoed deze dan niet is opgenomen in de inversiekaart.

Resultaten grensvlakken en inversie

De grensvlakkenkaarten van 1000 mg/l, 5000 mg/l, 10000 mg/l en de kaart met inversies zijn weergegeven in Figuur 2.12. In vergelijking tot het werk van Dijkstra en Volker (1962) is een stap gezet door gebruik te maken van alle op dit moment beschikbare VES metingen. Het geeft ook een eenduidiger beeld dan wanneer chloridecontouren per diepte interval worden gepresenteerd (o.a. ICW, 1982, Post, 2004) of op basis van uitsluitend chlorideconcentraties (o.a. Post, 2004, NITG-TNO, 2002). Daarnaast zijn door een combinatie van VES metingen en chloridemetingen de inversies in kaart gebracht.



Figuur 2.12. Diepte van het 1000 mg/l, 5000 mg/l en 10000 mg/l chloride grensvlak en de dikte van de inversies in het beheersgebied van HHNK.

2.4 Conceptuele analyse van de grondwatersystemen aan de hand van de nieuwe zoet-zout kaart

2.4.1 Eerder onderzoek

Willemsen (1981) en Post (2004) vatten het tot dan toe uitgevoerde onderzoek naar de relatie van de geologische en geografische geschiedenis met het voorkomen van zoet en zout samen en vormt de basis voor deze paragraaf. Door Post (2004) kunnen op grond van theoretische overwegingen en gegevens uit de literatuur het oplossen van steenzout, droge depositie van aerosolen, antropogene bronnen, omgekeerde osmose en bevrozing worden uitgesloten als oorzaak van de hoge zoutgehalten. Zeewaterintrusie door de aanleg van de diepe droogmakerijen speelt alleen vlak langs de kust een rol. Stuyfzand (1993) maakte met eenvoudige berekeningen en hydrochemische waarnemingen aannemelijk dat zeewater tot een afstand van maximaal 6 km landinwaarts van de huidige kustlijn kan zijn binnengedrongen.

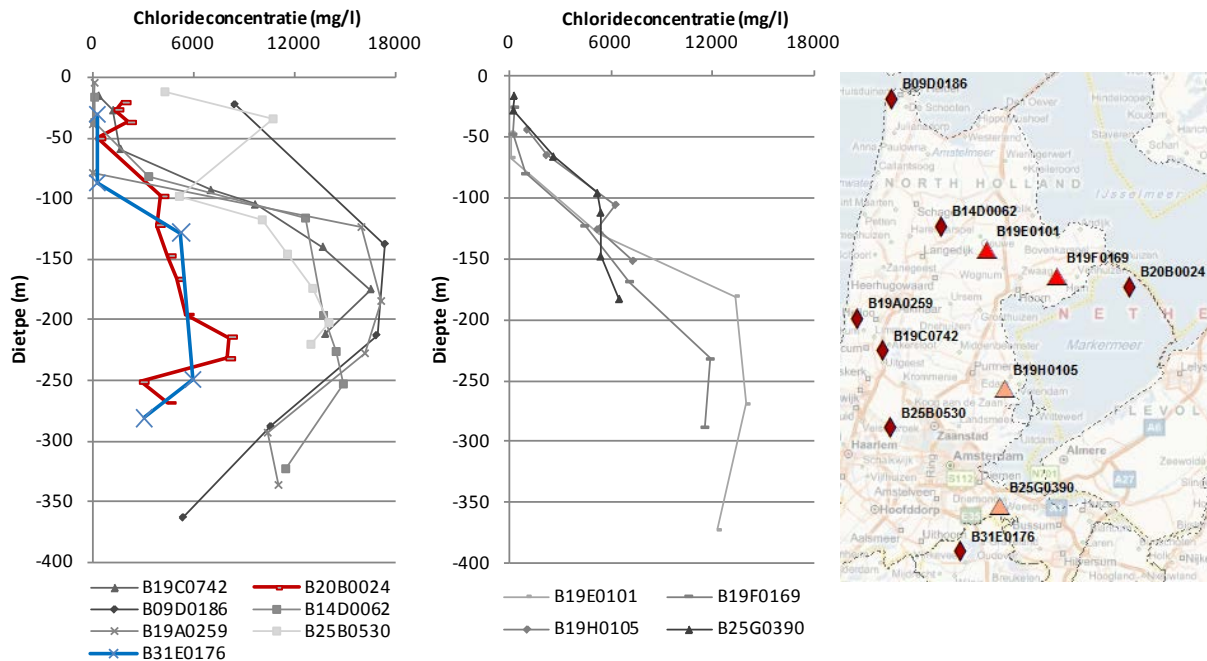
In de jaren 60 is door Volker (1961) aangetoond dat er diffusie van zout plaatsvindt onder het IJsselmeer (zie ook Figuur 2.10). Dit is later bevestigd en verder uitgewerkt in het proefschrift van Beekman (1991). Volgens Meinardi (1974) zou diffusie van bovenaf tijdens transgressies altijd de belangrijkste oorzaak van verzilting zijn. Dit proces is echter zo langzaam dat de duur van de transgressie niet lang genoeg zou zijn geweest. Een andere mogelijkheid ook door Meinardi (1974) aangevoerd wordt aangeduid met de 'dispersie-theorie'. Het idee achter zijn theorie is dat zout vanuit de mariene afzettingen van Vroeg-Pleistocene en Pliocene ouderdom door diffusie en dispersie omhoog beweegt naar de van oorsprong zoete Pleistocene fluviatile afzettingen. Hierbij is diepe oost-west grondwaterstroming de drijvende kracht achter het verziltingsproces. Door horizontale grondwaterstroming vindt in het Pleistocene watervoerende pakket menging (dispersie) plaats en op deze manier ontstaat een verticaal profiel waarin het zoutgehalte van het grondwater geleidelijk toeneemt met toenemende diepte.

Het connate zeewater in de Vroeg-Pleistocene en Pliocene mariene afzettingen heeft een ouderdom van ten minste 1,6 miljoen jaar. Versluys (1931), Engelen (1981), Van der Molen (1989) en Gieske (1991) meenden echter dat het zoute grondwater in de Pleistocene watervoerende pakketten veel jonger is en uit het Holoceen stamt. Zoals eerder beschreven drong de zee gedurende deze periode meerdere malen binnen. De ondergrond bevatte oorspronkelijk zoet grondwater dat een lagere dichtheid heeft dan het zeewater dat bovenop kwam te liggen. Bij een hoge doorlatendheid van de ondergrond is deze situatie instabiel en heeft het zeewater de neiging naar beneden te zakken, een proces dat wordt aangeduid met dichtheidsstroming of vrije convectie. Het belang van dichtheidsstroming werd begin jaren 80 onderkend toen zich dit onder een vuilstort in Noordwijk had voorgedaan (Willemsen, 1981). Later is dit proces ook modelmatig onderzocht voor mariene transgressies over een sedimenten met zoet grondwater (Post, 2004, Kooi en Groen, 2000).

Van Wieringen en Willemsen (1981) treffen in de polder Groot Mijdrecht een chloride inversie aan op een grote diepte met daarboven waarden die niet hoger zijn dan 6000 mg/l. In peilbuis B31E0176 in het noordoosten van Mijdrecht worden tot de formatie van Maassluis (ca 150m –mv) geen hogere waarde waargenomen. Alleen in de Formatie van Maassluis zelf op een diepte van 240m –mv wordt een waarde van 7100 mg/l aangetroffen. Echter op nog grotere diepte, circa 275 wordt juist weer een lagere waarde waargenomen van 3350 mg/l. Op basis hiervan wordt verondersteld dat dispersie/diffusie als oorzaak van het voorkomen van zout water onwaarschijnlijk is. Het beeld van een inversie op grotere diepte is niet uniek is op meerdere plaatsen in Noord-Holland

waargenomen. Figuur 2.13 geeft voor een aantal locaties in Noord-Holland het verloop van chloride met de diepte. Het betreft meetseries die tot grote diepte beschikbaar zijn.

Op basis van ouderdomsbepalingen en karakteristieke modelsimulaties heeft Post (2004) het waarschijnlijke verziltingsmechanisme verder uitgewerkt. Hieruit volgt dat de eerdere hypothese juist lijkt te zijn en dat grootste deel van het brakke- tot zoute grondwater in het gebied stamt uit het Holoceen. Met deze kennis in gedachten is de zoet-zoutverdeling vergeleken met de historische ontwikkeling van het gebied.



Figuur 2.13. Enkele diepteprofielen van chlorideconcentraties tot grotere dieptes. Links profielen waar een inversie op grotere diepte optreedt en rechts profielen waar dit niet het geval is.

2.4.2 Historische ontwikkeling en zoet-zout verdeling in verschillende gebieden

Door de verbeteringen van de zoet-zout kaart zijn nu structuren te zien die eerder niet zichtbaar waren. Dit levert een beter inzicht in de historische processen die van belang zijn voor de zoet-zout verdeling en wordt een empirische onderbouwing gegeven, die in dit gebied niet eerder op regionale schaal beschikbaar was. In deze paragraaf bespreken we dit op het niveau van het hele beheersgebied. In Noord Holland bepalen verschillende systemen het voorkomen van het zout, die opeenvolgend zullen worden behandeld:

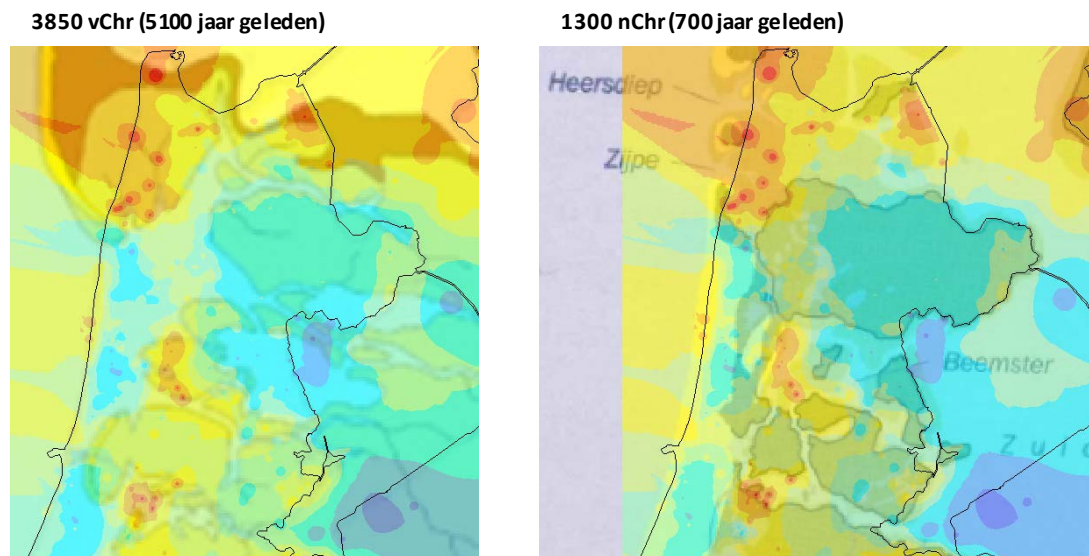
Aan de hand van de kaarten is het gebied in te delen in zones:

- (1) In het noordwesten van het gebied bevindt zich een zone van ondiep zout water dat zich uitstrekt van Den Helder tot Schagen
- (2) In de Wieringermeerpolder is een zone met ondiep hoge chlorideconcentraties. Met name in de oostelijke zone van de polder. In het centrale deel is sprake van een inversie.
- (3) Een zone in en rond West Friesland met zoet water. Dit gebied heeft om die reden ook de naam "de zoete bel van Hoorn".
- (4) Verder langs de kust drie min of meer los van elkaar staande zoetwaterbellen onder duinen, binnenduintrand en oude strandwallen bij Bergen, Castricum en Zandvoort.
- (5) Op enkele plaatsen achter de huidige duinenrij en aan de kust ten zuiden van Petten bevindt zich zout water bovenop het zoete water (inversie).

- (6) Ten zuiden van West-Friesland het gebied met de diepe droogmakerijen waar lokaal hoge chlorideconcentraties voorkomen.
- (7) Langs het Noordzee kanaal waar een complexe afwisseling is gevonden van zoet en zout grondwater.
- (8) En ten slotte in de zuidoost kant van het gebied, zich uitstrekkend over de Zuiderzee, is een inversie gevonden.

Noordwesten, zone van Den Helder tot Schagen

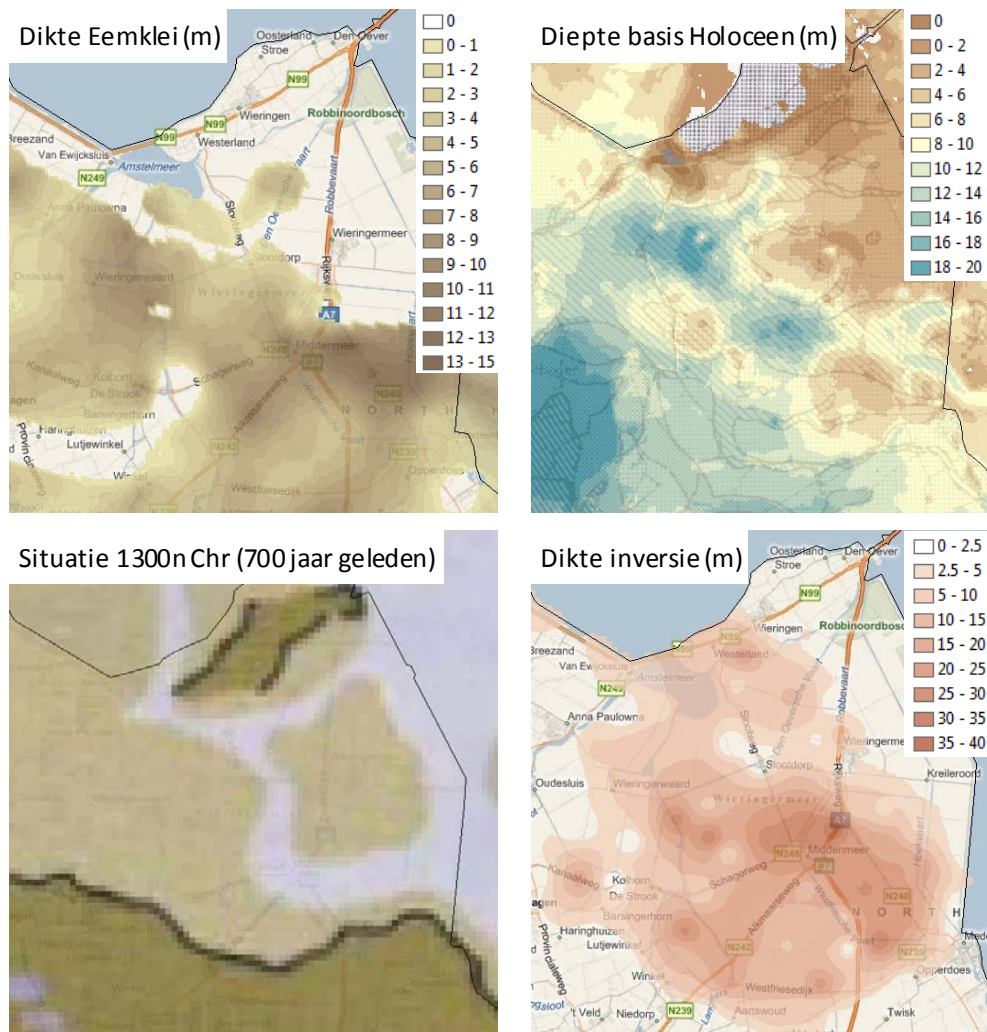
In het noordwesten van het gebied (1) bevindt zich een zone van ondiep zout water dat zich uitstrekt van Den Helder tot Schagen en loopt in feite door in de Waddenzee. Dit gebied is lang deel geweest van de Pleistocene kustboog van Texel en is pas relatief laat in het Holoceen onder water gelopen en deel geworden van het kweldersysteem. Hoewel verschillende bronnen een iets ander beeld geven (Berentsen, 1998; Zagwijn, 1986; NOAA; De Mulder et al., 2003) blijkt uit de meest recente kaarten dat tijdens het subboreaal (5000-3000 jaar geleden) dit gebied onder invloed stond van het zoute water in het getijdengebied achter het zeegat van Bergen. Een eerste mogelijkheid is dat het zout in de ondergrond in noordwest Noord Holland afkomstig uit deze tijd. Na de sluiting van het zeegat van Bergen vond hier veenvorming plaats totdat rond 700-1000 geleden, na de doorbraken bij Zijpe en Heersdiep, het land overstromde door de zee. Pas 200 tot 500 jaar later (na 1550 en deels na 1830) werd dit deel van het land teruggewonnen op de zee (Figuur 2.5), tot die tijd heeft het zout in de ondergrond kunnen indringen. Het indringen van zout water heeft moeten plaatsvinden in geulen die het hier aanwezige basisveen doorsnijden. Uit de huidige data is niet met zekerheid te zeggen uit of het zout afkomstig is uit de subboreale of de middeleeuwse overstroming van het gebied.



Figuur 2.14. Situatie 5100 jaar geleden (NOAA) en ca 700 jaar geleden (Mulder et al., 2003) gecombineerd met de diepte van het 5000 mg/l grensvlak.

Wieringermeerpolder

De Wieringermeerpolder (2) heeft een vergelijkbare Holocene historie als het noordwesten van het gebied. In een periode van ca 2500 jaar geleden tot 700 geleden was het gebied van de Wieringermeer nog land. Door de stormen van onder andere de 12e eeuw was het gebied onder water gelopen en onderdeel van de zee geworden waarbij het eiland Wieringen altijd een eiland is gebleven. Hierdoor begon een nieuwe periode van verzilting. De Wieringermeerpolder is pas recent teruggewonnen op de zee (1930). Bijzonder is het eiland Wieringen dat de huidige noordgrens van het vasteland vormt. Dit gedeelte is gedurende het Holoceen niet onder water gelopen. Hier bevindt zich keileem, dat is afgezet in de Pleistocene ijstijden, nabij of aan het oppervlak. De chloridekaart



Figuur 2.15. (a) Verspreiding en dikte(m) van de Eemafzettingen, (b) Holocene afzettingen, (c) situatie rond 1300 (Mulder et al. 2003) en (d) voorkomen van de inversie in de Wieringermeerpolder. (a en b uit REGIS II.1)

geeft hier een zoute concentratie, maar waarschijnlijk wordt de gemeten lage weerstand door de aanwezigheid van keileem veroorzaakt, het water onder het voormalige eiland is tot een diepte van ca 20-30m zoet.

Aan de IJsselmeerkust tot zo'n ca 10km landinwaarts wordt in het totale profiel brak tot zout water gevonden, waarbij hoge zoutgehaltenes aan de oostelijk zone worden aangetroffen. Verder landinwaarts in de Wieringermeerpolder is het water in de ondergrond echter zoet, wat deel uit maakt van de zoete bel van Hoorn, en wordt er alleen zout water gevonden in het bovenste gedeelte van het profiel. Gezien de recente inpoldering zijn de hoge chlorideconcentraties toe te kennen aan de recente verleden waarin de Wieringermeer nog onderdeel uitmaakte van de Zuiderzee.

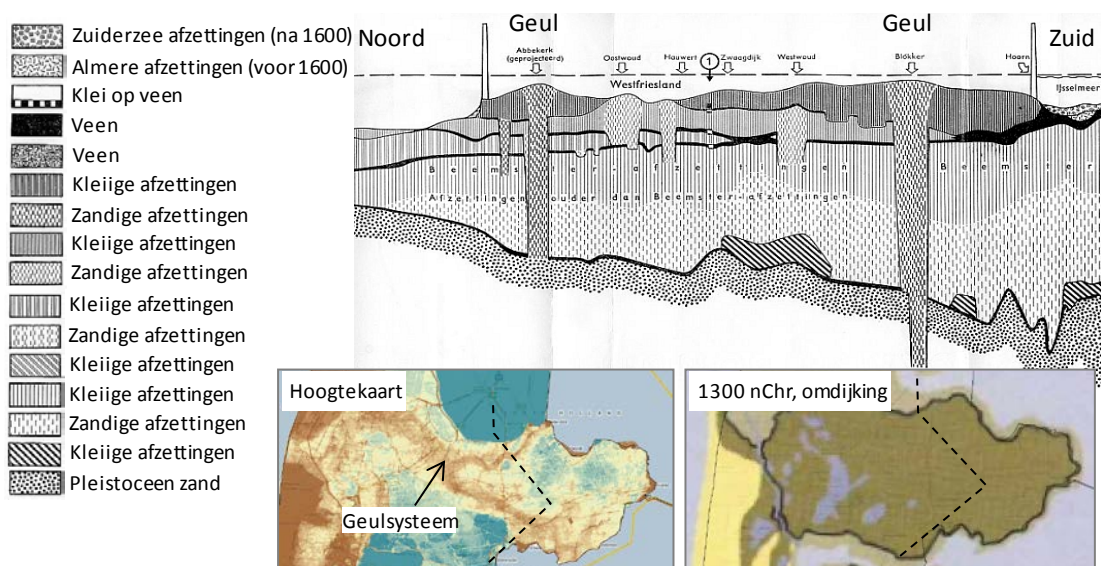
Het voorkomen van deze inversie is sterk gerelateerd aan een combinatie van de dikte en verspreiding van de kleiige Eemafzettingen en de tijdens het Holoceen gevormde geulen die in de Wieringermeerpolder het basisveen doorsnijden (Figuur 2.15b). Op plekken waar deze slecht doorlatende laag aanwezig is kon het zout water niet doordringen tot de diepere lagen en ligt het zout op de Eem klei (Figuur 2.15a). Alleen daar waar deze laag afwezig is, wordt het zout tot op grote diepte gevonden. De dikte van de inversielaag is gecorreleerd met de dikte en diepte van het Holocene pakket, en is maximaal op de plaatsen waar voormalige Holocene geulen hebben gelopen (Figuur 2.15).

West Friesland “de zoete bel van Hoorn”

Aan de oostkant van de provincie (3), op het grootste deel van Westfriesland, is tot op meer dan 100m diepte geen zout water (met een concentratie van 5000 of 10000 mg/L) aanwezig. Dit is opmerkelijk omdat juist dit deel van Noord Holland het langst onder invloed heeft gestaan van zout water dat vanuit de Noordzee dit gebied binnendrong in de periode van 7500 tot 4000 BP.

Witt en Wit (1982), ICW (1982) en Pomper (1983) leggen het ontstaan van de zoetwaterbel verder terug in het verleden. Het water zou van Pleistocene ouderdom zijn en zijn vastgelegd tijdens de transgressie in het Eem waarbij slechtdoorlatende lagen werden afgezet. De Vries (1981) plaatst het ontstaan van de zoetwaterbel ongeveer 3000 geleden toen het gebied zich voor een periode van 1000 jaar ongeveer 1,5m boven het zeeniveau bevond. De zoetwaterbel zou dan zijn gevormd door infiltratie van regenwater in diep insnijdende goed doorlatende zand geulen en de hogere ligging van het gebied (Beekman 1991). Recenter onderzoek door Beekman en Appelo (1989) en Beekman (1991) geven een indicatie voor een veel recentere ontstaansgeschiedenis.

Na het afsluiten van het zeegat van Bergen 3200 geleden werd dit toenmalige kweldergebied gevrijwaard van directe zeeinvloeden. De rond 1250 voltooide Westfriese Omringdijk heeft kunnen voorkomen dat dit gebied in de middeleeuwen onder zout water liep. Hierdoor heeft in de laatste eeuwen zoet water intrusie vanaf het oppervlak plaats kunnen vinden, resulterend in een aanzienlijke ondergrondse zoetwater voorraad. De zoetwaterlaag die zich nu onder het oppervlak bevindt heeft zich waarschijnlijk in de laatste paar duizend jaar ontwikkeld. Met ¹⁴C isotopenanalyses is aangetoond dat het zoete water zo'n 1200 jaar oud is in de noordelijke en westelijke gedeeltes van de zoete bel, terwijl in het centrum van de bel het water jonger is dan ~250 jaar (Beekman, 1991).



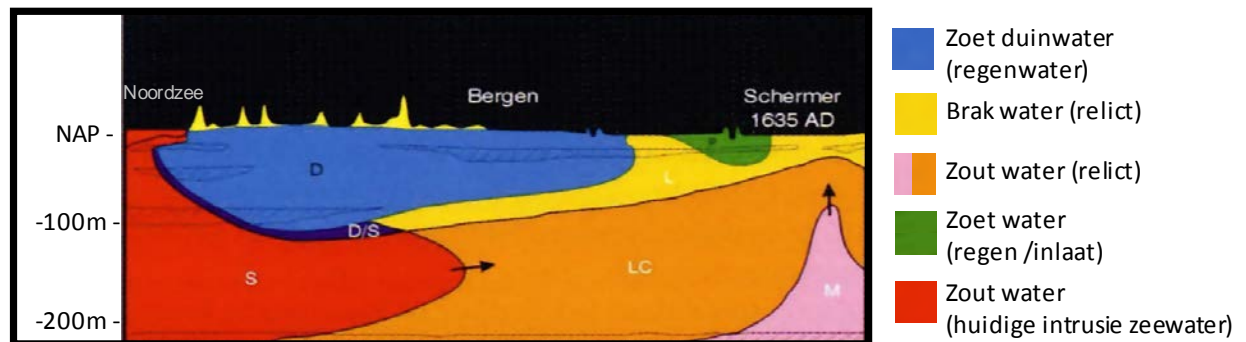
Figuur 2.16. Doorsnede door West-Friesland die de insnijding van de zandige geulen tot in het Pleistoceen laat zien (Pons en Wiggers, 1959). De twee andere figuren tonen het geulstelsel aan de hand van het AHN en de omdijking sinds 1300 n Chr (Mulder et.al. 2003).

Een overblijfsel van de kwelderomstandigheden is het geulpatroon in dit gebied dat duidelijk zichtbaar is in de hoogtekaart van het maaiveld. De geulen die nu duidelijk zichtbaar zijn in de hoogte van het maaiveld zijn zandgeulen, waaromheen het veen en de klei zijn ingeklonken, intrusie vond voornamelijk plaats via deze geulen (Figuur 2.16). Ook in het oostelijke deel van Westfriesland, waar het geulpatroon minder sterk aanwezig

is en waar de aanwezige geulen met relatief slecht doorlatende klei zijn gevuld, bevindt zich zoet water. Post et al. (2004) heeft met numerieke modellen aangetoond dat zout zich over meerdere kilometers in de ondergrond kan verspreiden. De aanwezigheid van zoet water in de oostpunt van de provincie suggereert dat het zout hier nooit is doorgedrongen in de eeuwen dat dit gebied onder invloed stond van zout water of, aannemelijker, dat het zoete water zich in de aquifer onder het basisveen heeft verspreid en het zoute water heeft verdrongen.

Zoetwaterbellen onder duinen

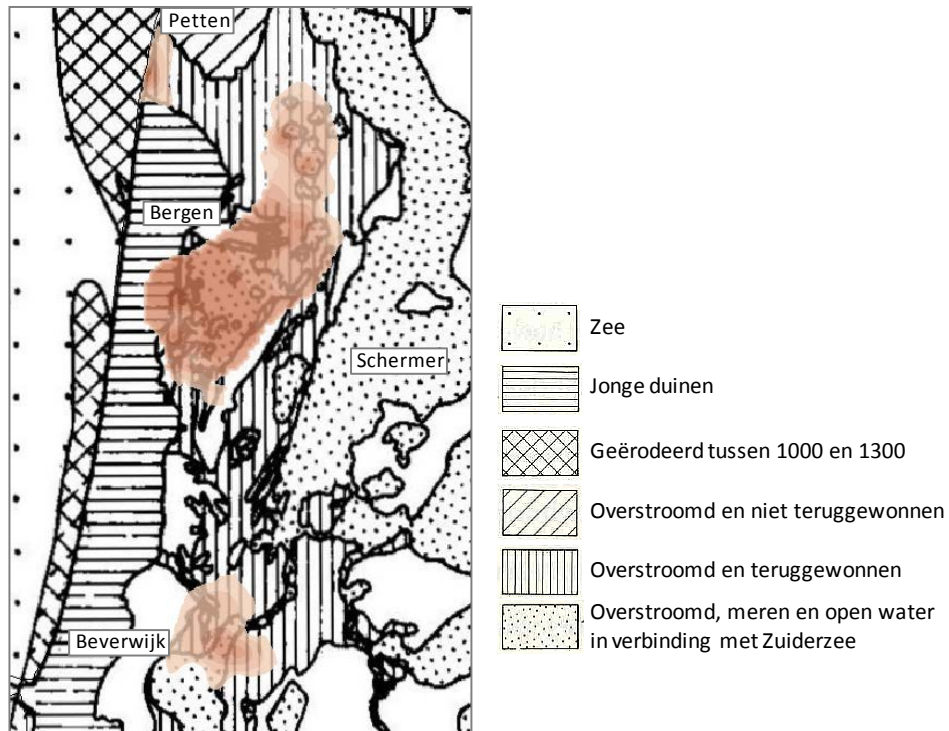
Onder de duinen (4) bevindt zich een zoet waterbel. Deze bel is aanwezig onder het huidige hoge gedeelte van de jonge duinen, maar strekt zich ook verder naar het oosten uit onder de oude duinen en strandwallen. Deze brede zone zoetwater wordt gevormd door relatief jong regenwater dat van bovenaf in de duinen is geïnfiltrerd. Het zoetwatervoorkomen dateert tot de periode waarin de strandwallen zijn ontstaan ca 5000 jaar geleden. De diepte van het zoete water onder de jonge duinen reikt tot meer dan 100m. Er infiltreert nog steeds zoet water op deze locaties omdat het hele duinsysteem inclusief de binnenduinrand en de oude strandwallen relatief hoog liggen ten opzichte van de omringende (diepe) droogmakerijen, waar het polderpeil kunstmatig onder zeeniveau wordt gehouden.



Figuur 2.17. Positie en bronnen van zoet en zout water voorkomens in een dwarsdoorsnede over de kustduinen bij Bergen. Het huidige Noordzeewater is ver ingedrongen door de hogere doorlatendheid van de bodem (naar Stuyfzand, 2007).

Inversie achter de huidige duinenrij en aan de kust ten zuiden van Petten

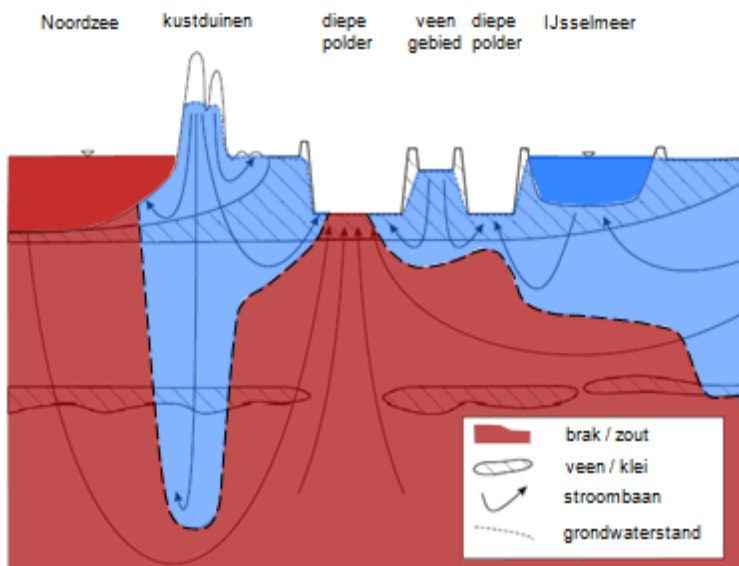
Bovenop de dikke laag zoet water achter de jonge duinen is op een aantal plaatsen zout water gevonden (5). Deze inversies bevinden zich (a) aan de kust ten Zuiden van Petten waar de zeewering smal is, (b) in een relatief brede strook achter de duinen van Bergen en (c) achter de duinen ter hoogte van Beverwijk. De inversies op deze drie verschillende plaatsen lijken met elkaar verbonden. Ze bevinden zich alle drie in het gebied dat rond 1300 grotendeels is teruggewonnen is na de eerdere doorbraak van de duinen op de plaats waar nu de inversie ten zuiden van Petten is gevonden (Figuur 2.18). Het water van deze doorbraak heeft grote delen van Noord Holland onder water gezet waarbij waarschijnlijk veel zout in de ondergrond is gedrongen (zie bijvoorbeeld de beschrijvingen van 1 en 2 in deze sectie). Naar het zuiden van het zeegat heeft het land korter onder water gestaan en is het zoute water daardoor waarschijnlijk slechts oppervlakkig in de ondergrond doorgedrongen. De inversies zijn voornamelijk te vinden op plekken waar na het terugwinnen nog een aantal meren bestonden, waarschijnlijk hebben deze bijgedragen aan het binnendringen van het zoute Noordzeewater in de ondergrond. Deze theorie kan de inversies gevonden aan de westkant van de provincie verklaren en suggereert dat het zoute water hier zo'n 1000 jaar oud is. Ondersteunend voor deze theorie dat de drie inversies gerelateerd zijn is het afnemende zoutgehalte van de inversie van 6000 mg/L aan de kust via 2500 mg/L achter Bergen tot 750 mg/L bij Beverwijk.



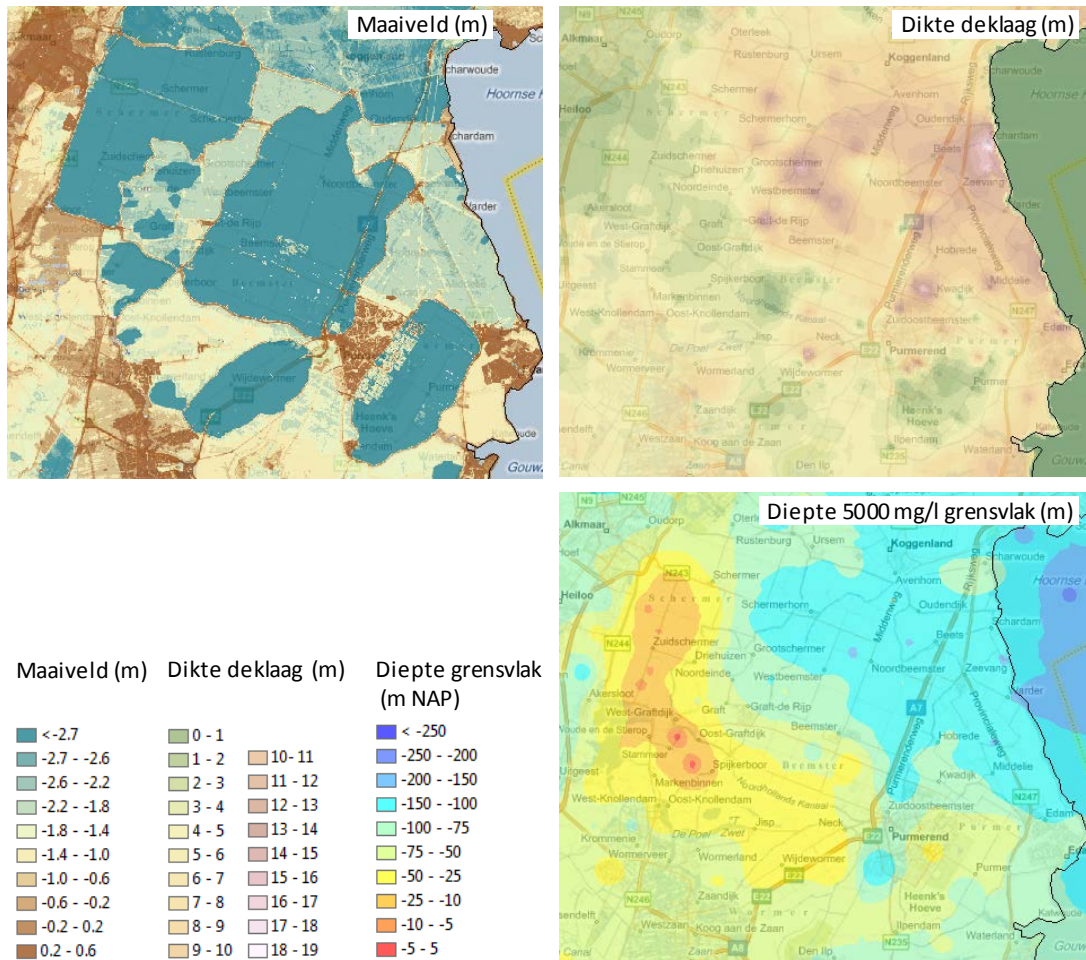
Figuur 2.18. Situatie rond 1300 (Hallewas, 1984) met daarop geprojecteerd de inversie.

Diepe droogmakerijen

Het gebied van de droogmakerijen is omstreeks 4000 BP afgesloten van directe zee invloeden en vanaf die tijd heeft hier veenvorming plaatsgevonden (Hallewas, 1984 en Mulder et al., 2003). Het zout gevonden in dit gebied moet daarom afkomstig zijn uit het eerste deel van het Holoceen (7000-4000 jaar geleden), of het is van veel recentere datum. Net als in het noordelijke deel van de provincie zijn ook hier rond 1000 BP grote delen onder water gelopen. In die periode leidde een combinatie van ontwatering,



Figuur 2.19. Schematische doorsnede van de grondwaterstroming in de ondergrond van Noord-Holland (naar Post, 2004).



Figuur 2.20. Maaiveld die de ligging van de diepe droogmakerijen toont (a), dikte van de deklaag (b) en diepteligging van het 5000 mg/l grensvlak (c).

inklinking en turfwinning tot de vorming van grote meren, die in open verbinding stonden met de Zuiderzee (Mulder et al., 2003; Hallewas, 1984; ICW, 1982). Deze situatie duurde voort tot in de 16^e eeuw. Hier kon het zoute water diep het land binnendringen waardoor verzilting van de ondergrond heeft kunnen optreden. Op dit moment is niet duidelijk of het zout van recente datum is of van de eerste helft van het Holoceen dateert.

Een omvangrijk zoutvoorkomen komt met name voor onder het zuidelijk deel van de Schermer en de Beemster en onder de gehele Purmer en Wormer. Opmerkelijk is dat in het noordelijke deel van de voormalige meren de Schermer en de Beemster weinig of geen zout op geringe diepte is aangetroffen. Het al dan niet voorkomen van zout vertoont een correlatie met de dikte van de deklaag (klei en veen) zoals Figuur 2.20 laat zien. De dikte van de deklaag is weer te verklaren met het voorkomen van de Holocene geulen en de doorlatendheid van de sedimenten waarmee deze zijn gevuld. In het zuiden van zowel de Beemster als de Schermer, waar de ondergrond zout is, komen geulen voor waar het basisveen is geërodeerd en waarin slechts weinig klei is afgezet. Naar het noorden toe in de Beemster zijn de geulen met een kleipakket van meer dan 3m gevuld (Figuur 2.2; Mulder, 1979).

Die plekken waar de deklaag dikker is heeft er waarschijnlijk voor gezorgd dat infiltratie van zout water niet (goed) mogelijk was. Dit is waarschijnlijk ook het geval in het noorden van de Schermer, zij het in mindere mate dan in de Beemster. Relevanter nu is de omgekeerde huidige situatie van kwel. Door het droogleggen in het begin van de 17^e eeuw is een niveauverschil ontstaan van ruim 2m met de omgeving en in mindere mate

een stijghoogteverschil met de diepere lagen. Dit verschil zorgt voor een opwaartse kweldruk.

Figuur 2.19 toont een typische situatie voor een diepe droogmakerij. Aan de randen van de polder kwelt zoet water uit de naastgelegen polders met een hoger peil. Daar waar de deklaag dun is zijn de stroomsnelheden grootst en kan zout water afkomstig zijn uit de diepere lagen die zout zijn.

Zone rondom het huidige Noordzee kanaal

In het zuiden van het gebied rondom het huidige Noordzee kanaal en onder ander Westzaan is water met een hoge zoutconcentratie aanwezig tot dicht bij het oppervlak (6). De zoutgehaltes variëren sterk, zowel lateraal als in de diepte, wat te verklaren uit het feit dat dit gebied altijd in open verbinding met de zee heeft gestaan. Tijdens een groot deel van het Holoceen als het oer-IJ en in later tijden als het IJ, wat pas recentelijk is gekanaliseerd.

Zuidoost kant van het gebied, zich uitstrekkend over het IJsselmeer

Aan de rand van het IJsselmeer is geen zout in de ondergrond gevonden en ook onder dit deel van het IJsselmeer/Markermeer is het zoutgehalte relatief laag. Dit komt ontwikkeling van dit gebied met wisselende zoutgehalten (Beekman, 1991):

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| 10000 – 7000 jaar geleden | : zoet |
| 7000 – 3400 jaar geleden | : brak-zout |
| 3400 – 2000 jaar geleden | : zoet |
| Jaar 0 – 1570 | : zoet-brak |
| 1570 – 1932 | : brak-zout (Zuiderzee) |
| 1932 – nu | : zoet (IJsselmeer) |

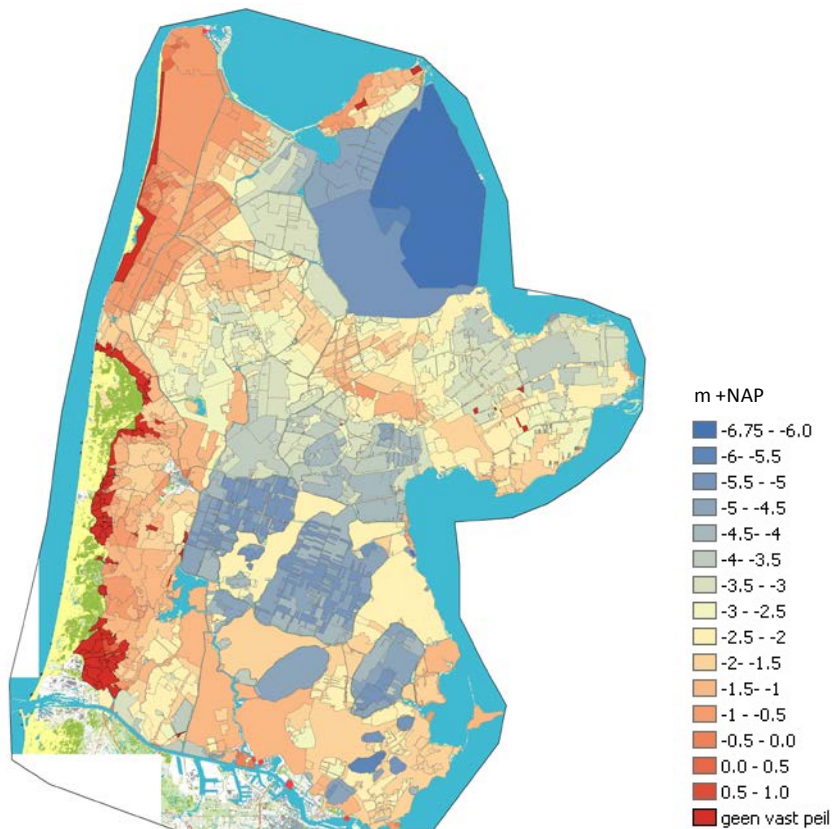
Bovenstaande chronologie van het gebied laat zien dat het nooit echt heel zout is geweest. Hier bevindt zich wel een inversie die aangeeft dat nabij het oppervlak wel zout is gevonden (7). De inversie is slechts in een klein deel van het IJsselmeer gevonden op basis van de VES interpretaties. De reden hiervoor is de relatief lage verticale resolutie van de 3-laags interpretatie van VES metingen die hier zijn gedaan en niet toereikend zijn om deze laag te zien (Dijkstra en Volker, 1957). Het gebied van de inversie beslaat een groter ruimtelijk gebied en bevindt zich ook naar het noorden toe een (dunne) laag zout water.

2.5 Berekeningen van grondwaterstroming en zoutbelasting in het beheersgebied van HHNK

Behalve de locatie van het zout in de ondergrond zoals beschreven en verklaard in de vorige paragrafen, is het voor het maken van een inschatting van de zoutbelasting belangrijk om te weten hoe het zout zich door de ondergrond verplaatst. De uiteindelijke zoutbelasting wordt bepaald uit de combinatie van het voorkomen van zout in de ondergrond en de grootte van de omhoog gerichte kwelflux. Zoutoverlast wordt verwacht op plaatsen waar netto een grote kwelflux is die zout water uit de ondergrond naar boven transporteert. Op plaatsen met netto infiltratie van het zoete regenwater wordt over het algemeen geen zoutprobleem verwacht.

Om tot een goede infiltratie en kwelkaart te komen om uiteindelijk een inschatting te kunnen maken van de zoutbelasting is een begrip van de stroming van het water door de ondergrond van belang. Om dit te simuleren hebben is gebruik gemaakt van het grondwatermodel Seawat. Dit is een op MODFLOW gebaseerde modelcode, zoals ook gebruikt in het NHI. SEAWAT is echter ook in staat zoet/zout berekeningen uit te voeren en maakt het mogelijk de berekende zoutconcentraties te vertalen naar zoutbelasting.

Voor een meer gedetailleerde beschrijving van het grondwatermodel wordt verwezen naar bijlage 13. Hieronder volgt een kort overzicht van belangrijke elementen. Zowel verticaal als horizontaal heeft het grondwatermodel dat in deze studie is gebruikt een hoge resolutie, waardoor bijvoorbeeld de gradiënt in het zout in de ondergrond goed kan worden gesimuleerd.



Figuur 2.21. Polderpeilenkaart in m NAP (Intwisbestand van HHNK). Het getoonde peil is het gemiddelde van winterpeil en zomerpeil, dat in de meeste gebieden vrijwel gelijk is.

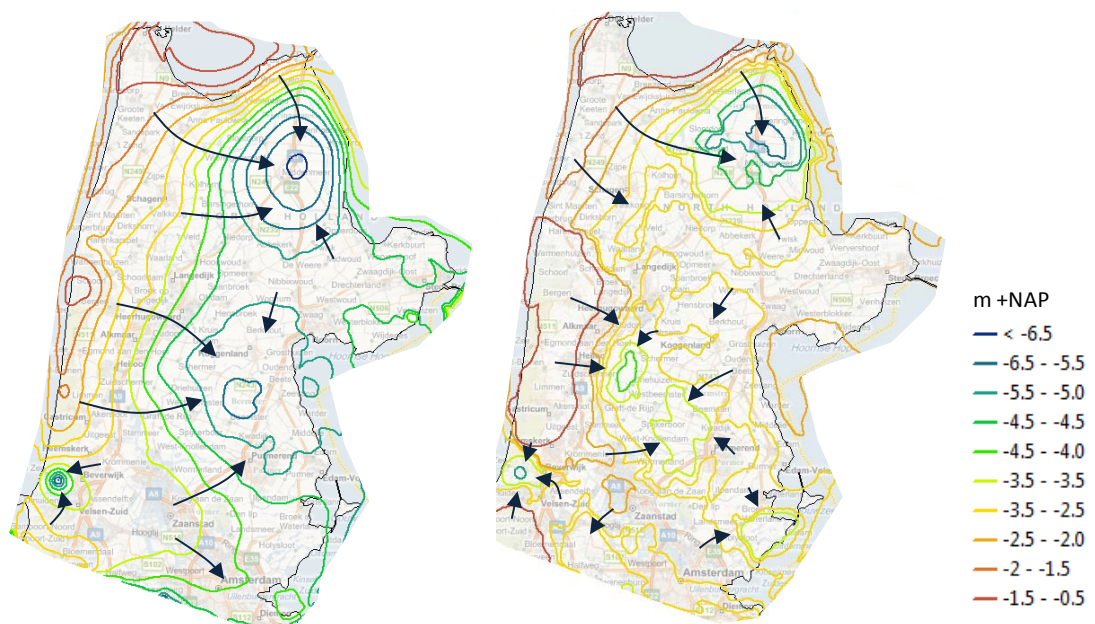
Effect van peilverschillen en zoutgehalte op grondwaterstroming

De grondwaterstroming wordt geleid door drukverschillen van het grondwater in de ondergrond en de weerstand van de verschillende pakketten. Deze drukverschillen worden aan de ene kant bepaald door verschillen in polderpeil, zeeniveau en peil van het IJsselmeer. Aan de andere kant wordt de stroming het gebied beïnvloed door de verschillen in het zoutgehalte. Door deze verschillen in zoutgehalte treden verschillen in de dichtheid op van het water die de stijghoogte beïnvloeden en daarmee de grondwaterstroming. Zoet water heeft een dichtheid van 1000 kg/m^3 en zeewater heeft een dichtheid van 1025 kg/m^3 . Zout water is dus zwaarder dan zoet water. Over het algemeen wordt de stijghoogte weergegevens als de waterstand ten opzichte van NAP, dit wordt de omgevingsstijghoogte genoemd. Om de omgevingsstijghoogte te vertalen naar een druk op een bepaalde diepte moet worden bepaald of de kolom boven dat punt zoet of zout water bevat. Bij zout water moet worden gecorrigeerd voor de extra druk door de verhoogde dichtheid van het water. De gecorrigeerde stijghoogte, behorende bij de echte druk op een bepaalde diepte, wordt de zoetwaterstijghoogte genoemd. Deze is hoger dan de absolute stijghoogte als de waterkolom zout water bevat (omgevingsstijghoogte). Dit is ook de manier waarop SEAWAT rekent. In dit rapport worden de resultaten als omgevingsstijghoogte gepresenteerd.

Op de meeste plaatsen in Noord Holland wordt een polderpeil onder zeeniveau gehandhaafd. De diepe droogmakerijen hebben een peil ver onder het zeeniveau met 4 tot meer dan 6 m onder NAP. Hierdoor wordt een drukverschil geïntroduceerd dat tot een sterke grondwaterstroming leidt. De polders, en met name de diepe droogmakerijen, hebben hierbij een aantrekkende werking waar grondwaterstroming zich naar toe richt. Door de algemene verlaging van het peil in Noord Holland is de grootschalige grondwaterstroming door het diepe watervoerende pakket zowel vanuit het IJsselmeer als vanuit de Noordzee richting het beheersgebied van HHNK gericht. Daarbij is bijvoorbeeld op een diepte van 200m is het effect van de wateronttrekkingen van de Wieringermeer en vanuit de Beemster duidelijk zichtbaar en op een diepte van ruim 70m is ook het effect van de Schermer op de stijghoogte zichtbaar (Figuur 2.22).

Het grondwatersysteem in het gebied bestaat uit een combinatie van diepe en ondiepe stroming. De meest grootschalige stroming is vanuit de duinen, waar de stijghoogte het hoogst is, naar de diepste polders, waar de stijghoogte het laagst is. Deze stroming is het wordt goed geïllustreerd op een diepte van 200m (Figuur 2.22). De bepalende polders op deze diepte zijn de Wieringermeerpolder en de Beemster. Daarnaast zijn er vele kleinschaliger systemen waarbij het drukverschil kleiner en de stroming minder diep is. Belangrijke componenten hierin zijn, van groot- naar kleinschalig, de stroming van de oude strandwallen naar de polders, de stroming van hooggelegen (veen-)polders naar dieper gelegen droogmakerijen en de stroming van de boezem naar de rand van de polder. Deze stromingen bepalen gezamenlijk de totale kwelflux en de origine van het water (zie ook Figuur 2.19).

De horizontale snelheid van de grondwaterstroming bedraagt maximaal enkele meters per jaar. De stroomsnelheden zijn afhankelijk van de gradiënten die hoog is vanuit de duinen maar erg laag is in het gebied van West-Friesland. De door de bodem af te leggen weg van een waterdeeltje vanuit de duinen of hooggelegen polders naar de diepe polders kan vele jaren in beslag nemen. Op korte termijn zal oud en vaak brak grondwater, dat zich voor het naderende zoete grondwater bevindt, blijven uitstromen in die polders. Afhankelijk van de afgelegde weg kan dat om tientallen jaren gaan, zoals langs de randen



Figuur 2.22. Stijghoogte op ca. 225 m –NAP (links) en stijghoogte op ca. 70m -NAP. Het regionale stijghoogteverloop van zee naar het achterliggend laagland en het effect van de Wieringermeerpolder en droogmakerijen is duidelijk zichtbaar.

van de diepe polders waar vaak nu al zoet water opkwelt (zuidelijke rand van Zuid-Schermer of oostelijk rand van Wieringermeer). Waterdeeltjes die een diepere en langere weg afleggen en in het midden van de diepe polder opkwellen doen er honderden tot duizenden jaren over. Daar zal de kwel voorlopig brak blijven.

Dit geeft een gemêleerd beeld in de polder waarbij verschillende beheersmaatregelen zich op verschillende orde van grote van systemen zullen richten. Bijvoorbeeld voor het doorspoelen van de vaarten en sloten is het van belang om het aandeel lokaal en relatief jong water in de kwel te weten, terwijl voor de inschatting van het effect van autonome ontwikkelingen het van belang is om de totale groot- en kleinschalige kwelflux en zoutbelasting te kennen.

Om de processen van de verschillende grondwaterstromingssystemen te simuleren is op twee verschillende schaalniveaus, op beheersgebiedsniveau (resolutie 250m) en op polder niveau (100m), gemodelleerd. Dit was een iteratief proces waarbij de resultaten van het grootschalige model als initiële- en randcondities zijn gebruikt in de twee detailmodellen voor de polders Schermer en de Wieringermeer. De met de op polderniveau aanwezige gegevens verder geoptimaliseerde modellen zijn daarna weer geïmplementeerd in het regionale model. De resultaten worden besproken in dit hoofdstuk voor het gebiedsdekkende model en in het volgende hoofdstuk voor de polderschaal.

2.5.1 Weerstand van de afdekkende laag en het basisveen

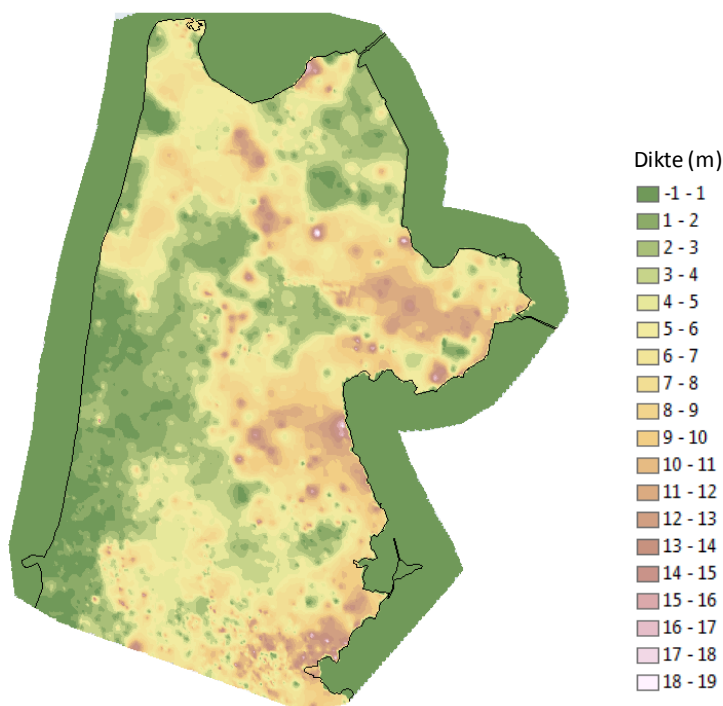
De weerstand van de verschillende lagen in de ondergrond zijn bepalend voor de locaties en de grootte van de kwelflux. Eerdere studies (Bijlmermeer en Mijdrecht) lieten zien dat een gedetailleerde analyse van de opbouw en daarbij behorende hydraulische weerstand van de deklaag essentieel is voor het begrip van de variatie in de stijghoogte en de hoeveelheid kwel (Velstra et. al., 2011 en Velstra et.al. 2008) en deze goed te simuleren.

De bodemopbouw in een groot deel van het beheersgebied bestaat uit klei, zand en veen. Waarbij de veenlagen bestaan uit Hollandveen en Basisveen. Vooral deze laatste laag heeft een zeer hoge weerstand, doordat de veenlagen zijn samengedrukt in de loop van het holoceen tot een zeer slecht waterdoorlatende laag. Op de plekken waar basisveen in de ondergrond voorkomt is dit de bepalende laag voor de weerstand en zijn de andere lagen minder van belang. Het basisveen is aan het begin van het Holoceen gevormd, deze laag bevindt zich direct op het Pleistoceen. Op sommige plekken is het basisveen geërodeerd en is er in de voormalige getijdegeulen een verbinding ontstaan met het watervoerend pakket van Pleistocene afzettingen. Deels zijn de voormalige getijde geulen gevuld met slecht doorlatende klei afzettingen en deels met zandafzettingen met een lage hydrologische weerstand (Figuur 2.2).

De beschikbare data zijn geanalyseerd en op basis daarvan is een kaart van de dikte van de deklaag en een basisveenvlakkenkaart gemaakt (Figuur 2.23). Hierbij moet worden opgemerkt dat de deklaagkaart de dikte van de deklaag in hydrologische zin weergeeft, hiermee wordt bedoeld de dikte van de afdekkende klei/veenlaag met een hoge hydrologische weerstand en niet de dikte van het Holoceen. Deze kaarten zijn tot stand gekomen door:

- De analyse van 5855 boringen uit de DINO-database van TNO. Vanwege de redelijk constante diepte van de basisveen afzetting was een analyse van de boringen op veen in dat diepte interval goed te automatiseren. Belangrijk is de kwaliteit van de boring mee te nemen. Het basisveen is zo nu en dan minder dan 50 cm dik, waardoor in grove boringen de laag soms niet beschreven is. Op plaatsen waar slechts boringen met een lage resolutie beschikbaar zijn is daarom de informatie uit eerdere kaarten en uit peilbuizen zwaarder meegewogen.

- De eerdergenoemde kaart van interpretatie van de samenstelling van de deklaag uit de Mulder (1979) (Figuur 2.2)
- Verbreiding van basisveen voor een deel van het gebied uit de geologische kaart (Westerhoff, et.al. 1987)
- Een hydrologische analyse van peilbuizen uit de DINO-database van TNO met filter boven en onder de deklaag. Bij afwezigheid van een stijghoogteverschil is de kans groot dat het basisveen afwezig is ter plaatse en is in de kaart geen veen aanwezig. Bij een stijghoogteverschil is de aanwezigheid van basisveen verondersteld. Met klei gevulde Holocene geulen, die een vergelijkbare weerstand hebben als de plekken waar het basisveen niet is geërodeerd, zijn hierdoor mogelijk gekarteerd alsof er basisveen voorkomt. Dit is voor onze toepassing geen probleem omdat ze dezelfde hydrologische karakteristiek, namelijk een hoge hydrologische weerstand, hebben als de plekken waar wel basisveen voorkomt.

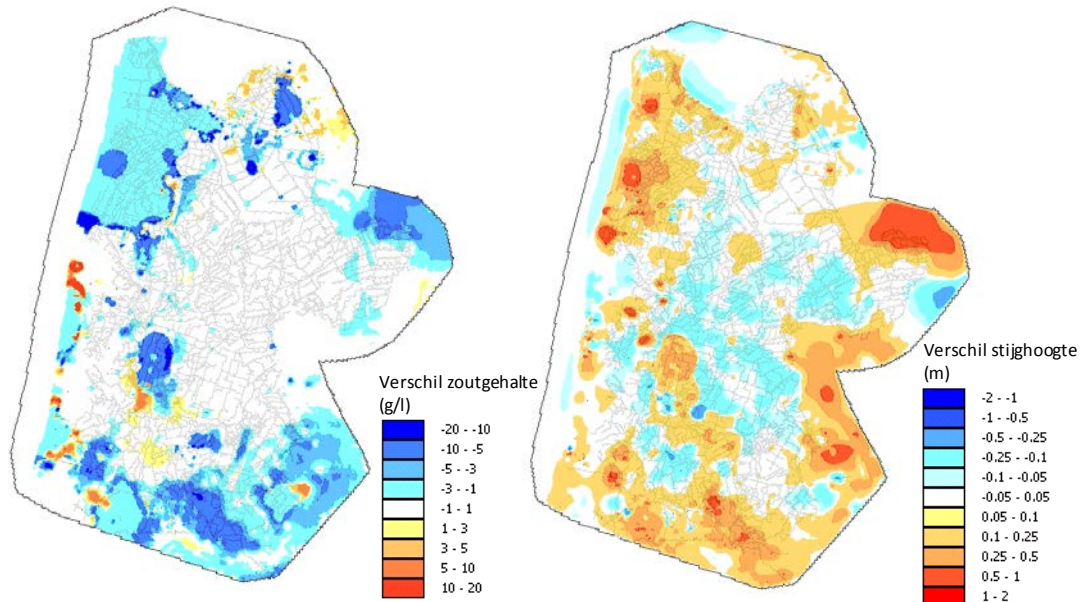


Figuur 2.23. Dikte van de deklaag op basis boringen, kaarten en hydrologische analyse peilbuizen.

Een groot deel van het beheersgebied heeft een afdekkend klei/veenpakket van tenminste 5 meter dik. Opvallend is de dikke deklaag in het oosten van het beheersgebied en het gebied van Hoorn tot Enkhuizen. Nauwelijks deklaagdikte vindt men onder de duinen, de binnenduinrand, maar ook verder inwaarts zoals de oude strandwal bij Alkmaar en zelfs tot aan de Schermer. Een dunne deklaag correspondeert over het algemeen met geulen (Figuur 2.2). Bijvoorbeeld de geulen in West-Friesland, Wieringermeerpolder. Ook in de basisveenvlakkenkaart komt duidelijk de hogere weerstand aan de oostzijde van de provincie naar voren. Hier is het basisveen niet geërodeerd, of zijn de geulen gevuld met kleiafzettingen. In het zuiden en noordwesten van de provincie komt basisveen voor op plekken waar de deklaag relatief dun is. Hier zorgt het voorkomen van basisveen voor een hoge weerstand ondanks de dunne deklaag. Hiertussen bevinden zich gaten in de laag basisveen, die veelal samenvallen met de plaatsen met een dunne deklaag, waardoor de hydraulische weerstand hier lager zal zijn.

2.5.2 Effect van de zoet-zout verdeling voor de grondwaterstroming

Eerder is al uitgelegd dat de verdeling van zoet en zout water mede bepalend is voor het drukveld en de stijghoogtes in de ondergrond (2.5). De nauwkeurigheid waarmee de zoutverdeling in de ondergrond wordt meegenomen bepaalt daarom hoe goed de bepaling van de drukvelden en daarmee van het grondwaterstromingspatroon in de ondergrond is (zie ook kader).



Figuur 2.24. (a) Verskil in zoutconcentratie (g/l) voor en na optimalisatie van de zoutverdeling in de ondergrond in laag 15 van het model en (b) de verandering in de gesimuleerde stijghoogte (m) in het eerste regionale watervoerende pakket op ongeveer 15-70 meter diepte, laag 9 van het model.

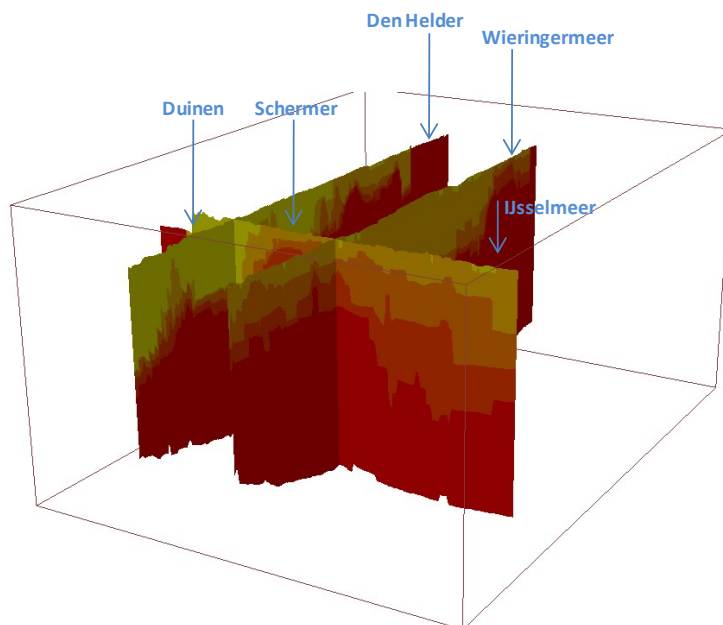
Belang van goede zoet-zout verdeling voor grondwatermodel

Aan de hand van puntwaarnemingen van stofconcentraties (bijvoorbeeld chloride) of elektrische geleidbaarheid wordt normaliter door middel van inter- en extrapolatie een chlorideverdeling van het grondwater gegenereerd. Bij 3D modellen is het vrijwel onmogelijk om langs deze weg een nauwkeurig chlorideverdeling te verkrijgen. Fouten in de bepaling van de chlorideconcentraties laten zich gemakkelijk introduceren. Zeker op grotere diepten waar het aantal waarnemingen over het algemeen beperkt is. Zo kunnen niet-bestaande tegenstellingen of variaties van zoet en zout grondwater eenvoudig ontstaan. Deze fouten beïnvloeden wel direct de grondwaterstroming. Stofconcentraties en grondwaterstroming zijn namelijk direct aan elkaar gekoppeld.

In eerste instantie lijkt een gegenereerd dichtheidsveld visueel misschien wel in orde. Maar na analyse van de resultaten, met name de grondwatersnelheden, blijkt het dichtheidsveld grote fouten te bevatten. Zulke fouten uiten zich bijvoorbeeld in zones van het grondwatersysteem waar de verticale grondwatersnelheid onrealistisch sterk fluctueert. Deze kunstmatige grondwaterstromingen kunnen dominant zijn en de werkelijke grondwaterstroming overtreffen. Uiteindelijk is deskundige kennis van de hydrogeologische en geochemische situatie doorslaggevend bij het verkrijgen van een juiste 3D chlorideverdeling, waarbij een zeer groot aantal chloridemetingen desalniettemin onontbeerlijk is (Oude Essink, 2002).

De grootte van de invloed van het zout op de stijghoogte wordt geïllustreerd door Figuur 2.24. Hierin worden de resultaten van de simulatie voor en na de optimalisatie van de zoutverdeling in de ondergrond weergegeven voor het eerste regionale watervoerend pakket. De optimalisatie bestaat uit het valideren van de VES-metingen met de beschikbare chloridemetingen (zie sectie 2.1.2). Op een aantal plaatsen is de concentratie in de ondergrond na de optimalisatie veel lager geworden, met verschillen op veel plaatsen tot -3.000 mg/L oplopend tot -10.000 mg/l of zelfs -20.000 mg/l op enkele plaatsen in het gebied (Figuur 2.24a). Dit leidt tot een sterke verschuiving in de berekende stijghoogten. Opvallend is dat niet alleen op de plaatsen met andere zoutconcentraties er aanzienlijke verschillen in stijghoogten berekend worden, maar ook op andere plaatsen waar de zoutconcentratie *niet* is veranderd zijn duidelijke stijghoogteveranderingen te zien. De berekende stijghoogte is gestegen met ongeveer 0.25m tot 2m op de plaatsen waar de zoutconcentratie is veranderd en afgenomen met ongeveer -0.1m tot -0.25m op plaatsen daarnaast. Wanneer de druk ergens in het model verandert leidt dit tot een verandering van de drukverdeling in het gehele model.

Om bovengenoemde afwijkingen te voorkomen is in deze studie veel aandacht besteed aan het correct implementeren van de zoutverdeling in de ondergrond. In de grondwatermodellen is de geoptimaliseerde zoutverdeling gebruikt zoals beschreven in paragraaf 2.3. Daarnaast heeft het model een hoge verticale resolutie, waardoor de verdeling van het zout in de ondergrond met groot detail kan worden meegenomen. Dit voorkomt onder andere dat de weerstand van de bodemlagen in het model op een onrealistische manier moet worden aangepast om de stijghoogtes correct te kunnen simuleren. De verbetering van de zoutverdelingskaart en de hoge verticale resolutie zijn belangrijke eigenschappen van het grondwatermodel in deze studie en zijn essentieel voor een betrouwbare simulatie van de toekomstige ontwikkelingen.



Figuur 2.25. Een 3D weergave van de zoetzoutverdeling in het grondwatermodel. (geel is zoet, rood is zout).

2.5.3 Kwelkaart en zoutbelasting

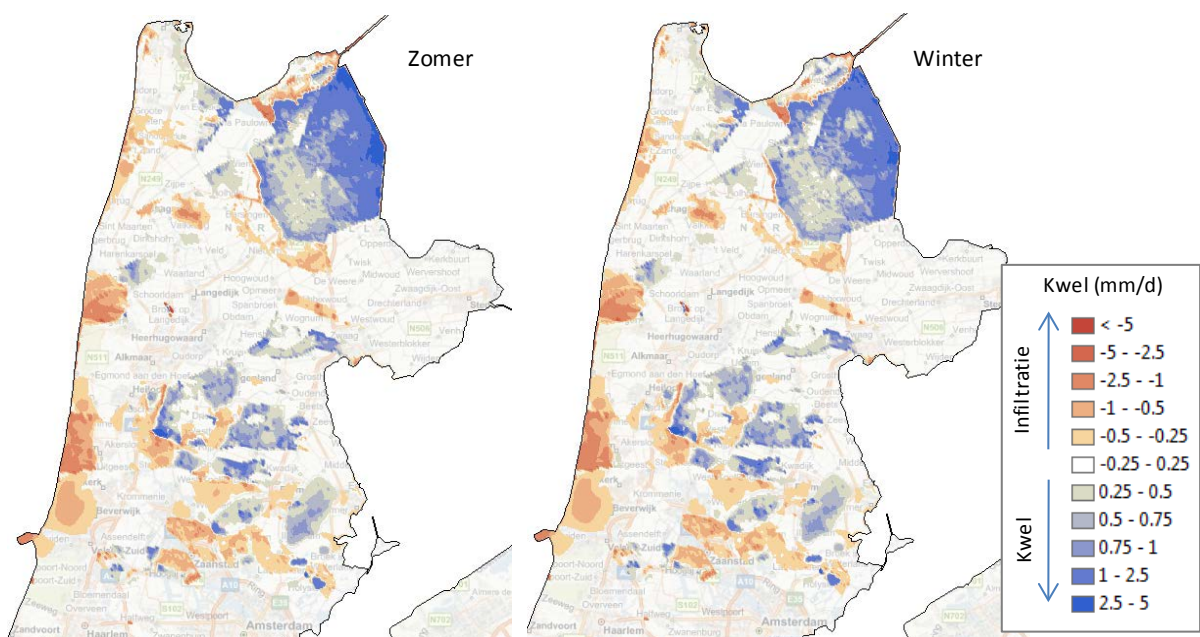
Zoutbelasting in eerdere studies

De zoutbelasting is ook in eerdere studies in kaart gebracht. In de huidige studie is het volledige grondwaterstromingsveld gesimuleerd, in tegenstelling tot de twee eerdere studies, waar stijghoogte uit metingen rechtstreeks is gebruikt voor de bepaling van de fluxen. Het grote voordeel van modelsimulaties is dat we hierdoor ook toekomstige scenario's kunnen doorrekenen en niet alleen de huidige zoutbelasting, maar ook de toekomstige kunnen bepalen. Daarnaast kan het model ook effecten berekenen van ingrepen op kwel, grondwaterstand en zoutbelasting.

Voor de huidige situatie zal de zoutbelastingskaart vooral zijn verbeterd in vergelijking met de eerdere studies op locaties waar het aantal metingen boven en onder de afdekkende laag gering is. Daarnaast is de nieuwe interpretatie van de zoutverdeling gedetailleerder dan in de vorige studies, waardoor ook de zoutbelastingsschatting gedetailleerder is. In het ICW rapport (1982) werd een de maximaal gemeten zoutconcentratie onder een sloot gebruikt als concentratiewaarde voor de hele polder. Door de mogelijke variatie in het zoutgehalte binnen een polder wordt in die studie de zoutbelasting over het algemeen overschat. Het resultaat van Griffioen et al (2002) was voor de diepe droogmakerijen vergelijkbaar met het resultaat van deze studie. Een opvallend verschil met deze vorige studie is de zoutbelasting in de veenpolders in centraal Noord Holland die zij hebben gevonden niet naar voren komt in deze studie. Het chloride gehalte onder deze gebieden is lager en de kwel flux is gering, waardoor de zoutbelasting hier zeer klein is.

Kwel en infiltratie

De infiltratie en kwel vertonen een grote ruimtelijk variatie (Figuur 2.26). Duidelijk is te zien dat veel water infiltreert vanuit de duinen. Aan de randen van duinen – in de binnenduinrand – kwelt het water op. Dit komt overeen met de overlastsituatie die daar bij hevige regenbuien plaats vindt. Ook in de veenpolders tussen de diepe droogmakerijen infiltreert water. De sterkste kwel bevindt zich langs de randen van de droogmakerijen en is afkomstig van naburige polders, boezemvaarten, meren of de zee. Bijvoorbeeld de



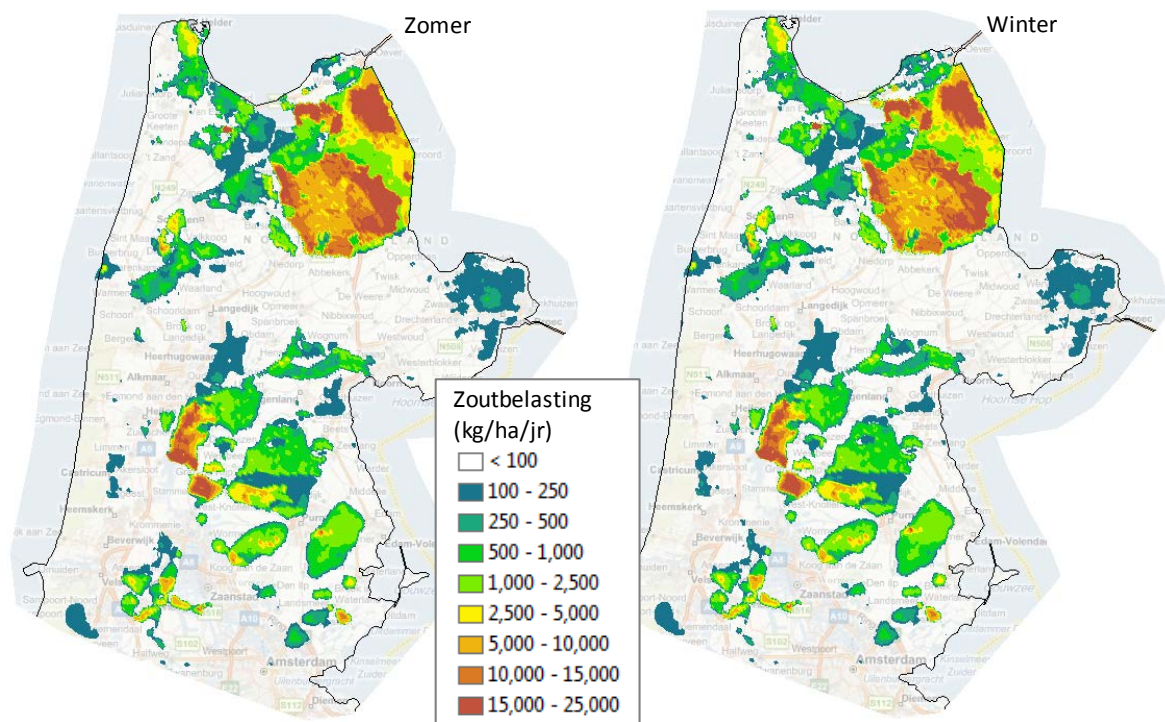
Figuur 2.26. De met het grondwatermodel berekende kwelkaart voor een gemiddelde situatie.

Wieringermeer heeft een sterke kwelintensiteit langs de kust. Dit wordt veroorzaakt door de lage weerstand van de deklaag in de Wieringermeer, de lage weerstand onder het IJsselmeer ter plekke (basisveen is afwezig) én het zeer grote peilverschil tussen Wieringermeerpolder en IJsselmeer. Ook de droogmakerijen in centraal Noord Holland hebben een sterke kwel. In de Schermer is vooral de kwel aan de zuidkant van de polder groot vanwege de nabijheid van het Alkmaardermeer. Naar het noorden van de Schermer neemt de kweldruk af. Dit komt door een toenemende dikte van de afdekkende laag naar het noorden toe, en de infiltratie ten zuiden van de Schermer vanuit het Alkmaardermeer.

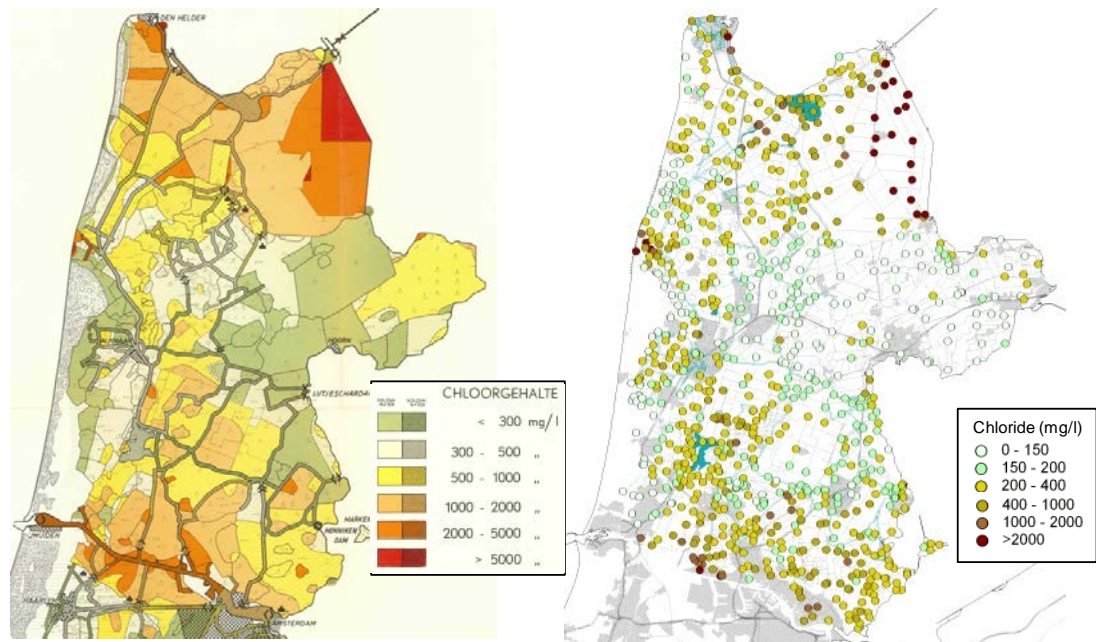
Zoutbelasting

Het grondwatermodel is toegepast om de zoutbelasting in het beheersgebied te bepalen (Figuur 2.27). Deze zoutbelastingskaart komt in feite neer op een vermenigvuldiging van de kwelkaart (Figuur 2.26, die de kwantiteit van het omhoogkomende water aangeeft), met de chlorideconcentratiekaart in de ondergrond (Figuur 2.12). Dit verklaart dat slechts op plaatsen waar kwel is een zoutbelasting berekend is en op plaatsen met infiltratie is geen zoutbelasting van toepassing is.

De zoutbelastingskaart is vergeleken met de verziltingskaart uit de COLN studie uit de jaren 50 (de Vries en Vrijhof, 1958). Deze verziltingskaart is gebaseerd op metingen in het oppervlaktewater voor de zomer van 1952-1954. Ook is gebruik gemaakt van de chloridemetingen van HHNK (zomer periode 1993-1997). Het betreft metingen in chloride mg/l en niet in kg/ha/jr, waarvoor een kwelflux nodig is. Maar de kaart is heel bruikbaar om de gebieden waar verzilting optreedt met elkaar te vergelijken. Gekozen is voor de winterperiode omdat dat dan geen of beperkt inlaatwater in het systeem aanwezig is. De hier berekende zoutbelasting komt goed overeen met deze kaarten. Al zijn er natuurlijk kleine verschillen. Bijvoorbeeld in de berekening lijkt de zoutbelasting onderschat in de oostrand van WestFriesland.



Figuur 2.27. De met het grondwatermodel berekende zoutbelasting voor zomer (links) en winter (rechts).



Figuur 2.28. Links verziltingskaart polder en boezemwater uit de COLN studie uit de jaren 50 (de Vries en Vrijhof, 1958). Rechts chloridemetingen oppervlaktewater zomerperiode 1993-1997 (databank HHNK).

Op enkele plekken in het beheersgebied wordt een hoge zoutbelasting gevonden. De zoutbelasting is maximaal in de twee polders de Schermer en de Wieringermeer. In de detailstudie van de Schermer wordt de ruimtelijke variatie in de zoutbelasting binnen de polder nog verder uitgewerkt. Uit de gebiedsdekkende simulatie blijkt dat vrijwel alle diepe droogmakerijen een zoutbelasting van meer dan 1.000 kg/ha/jr hebben. In de Wieringermeerpolder, Schermer en Starnmeer is de zoutbelasting meer dan 10.000 kg/ha/jr en lokaal zelfs meer dan 25.000 kg/ha/jr. In andere droogmakerijen heeft slechts een deel van de polder te maken met zoutbelasting. In bijvoorbeeld de Beemster is alleen aan de zuidkant een zoutbelasting te zien. Aan de noordkant van de polder is de gesimuleerde kwelflux iets kleiner, en wordt vooral een lager chloridegehalte in de ondergrond gevonden. Door dit detailniveau kan de variatie in het gebied goed gesimuleerd worden die relevant is voor het waterbeheer. In grote gedeeltes van het gebied blijkt hieruit dat zoutbelasting gering is of afwezig is. Dit zijn gebieden waar infiltratie is of gebieden waar wel kwel is maar het zoutgehalte gering is.

2.6 Veranderingen in grondwaterstroming en zoutbelasting als gevolg van autonome ontwikkelingen

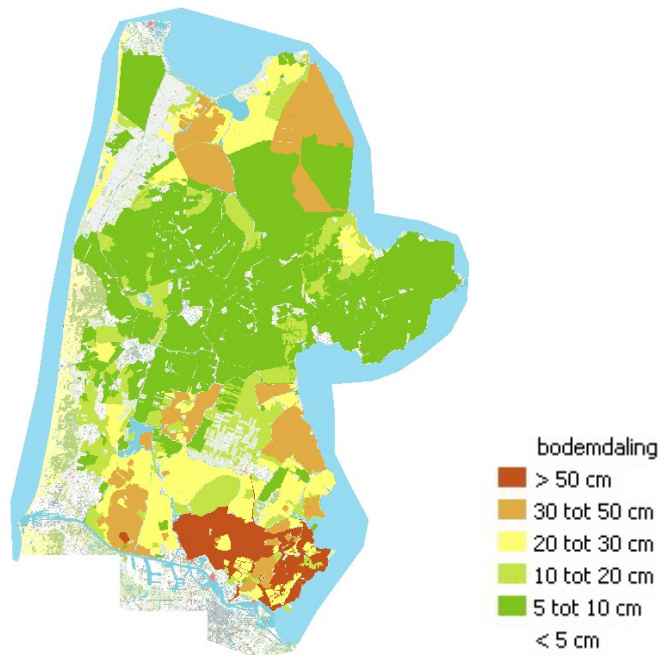
2.6.1 Autonome ontwikkelingen

In Noord Holland spelen een aantal autonome ontwikkelingen die kunnen leiden tot een verandering in de zoutbelasting. De belangrijkste extern gestuurde ontwikkelingen voor de zoutdruk zijn de (1) de bodemdaling, (2) de zeespiegelstijging en (3) de klimaatverandering. Daarnaast kan de zoutbelasting als een toenemend probleem worden ervaren als de landbouw meer gebruik gaat maken van hoogwaardiger, maar vaak ziltgevoeliger gewassen. In deze sectie wordt aandacht besteed aan de fysische veranderingen die van invloed zijn op het zoutgehalte in het gebied, in hoofdstuk 5 wordt aandacht besteed aan de beleidsmatige en interne ontwikkelingen in de polders.

Bodemdaling

In Noord Holland daalt de bodem door zowel natuurlijke als door mensen geïntroduceerde processen. De natuurlijke daling bedraagt ongeveer 25 mm/eeuw en wordt veroorzaakt door isostatie, waarbij Noord Holland daalt als reactie op de post-glaciale opvering van Scandinavië sinds het wegsmelten van de gletsjers uit de ijstijd. De bodem daalt ook in geringe mate door compactie van de bodemlagen onder hun eigen gewicht. Daarnaast treedt sterke bodemdaling op in Noord Holland op plaatsen waar veel veen en/of klei in de ondergrond zit vanwege ontwatering of door grote belasting na bebouwing. Dit proces is dominant in het grootste deel van Noord Holland en veroorzaakt een bodemdaling tot meer dan 50cm in de komende halve eeuw. Het is deels door natuurlijke ontwatering van het veen veroorzaakt, maar voor het grootste deel het gevolg van antropogene ontwatering na het inpolderen van het gebied. De bodemdaling is vooral groot aan de noord en zuidkant van het beheersgebied.

Om de gevolgen van bodemdaling in kaart te brengen is met het grondwatermodel een berekening uitgevoerd met daarin een aangepast maaiveld zodat het de verwachte bodemdaling in 2050 reflecteert. Hiervoor is gebruik gemaakt van een bewerkte bodemdalingskaart van RIZA (2005). Uitgegaan is van een worst case benadering, waarbij voor elke polder de grootste te verwachten bodemdaling binnen de polder is gebruikt als waarde voor de hele polder (Figuur 2.29). Aangenomen is verder het peil volgt maaiveld principe. Dit betekent dat het peil in de polders evenveel daalt als de bodem.



Figuur 2.29. Bodemdaling per polderenheid (van Staveren en Velstra, 2011) op basis van de landelijke bodemdalingskaart (RIZA, 2005).

Zeespiegelstijging

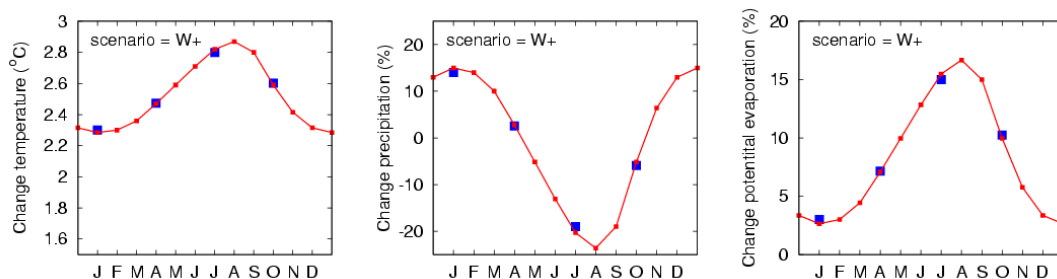
Als gevolg van klimaatverandering is zeespiegelstijging voorspeld. Dit is enerzijds een direct gevolg van de voorspelde opwarming van de aarde omdat het zeewater uitzet bij een verhoging van de temperatuur, waardoor het volume van het in de zee aanwezige water toeneemt. Anderzijds leidt de stijgende temperatuur tot het afsmelten van gletsjers en ijskappen waardoor het water dat momenteel opgeslagen zit landijs zich verplaatst naar de zeeën. Het KNMI heeft een aantal scenario's voor Nederland ontwikkeld, waarop later ook de scenario's die de deltacommissie zijn gebaseerd. In deze studie zijn de meest recente scenario's gebruikt: de KNMI '06 scenario's, met de aanvullingen uit 2009. De voorspellingen voor 2050 zijn bij de KNMI en de Deltacommissie hetzelfde: 20-35 cm zeespiegelstijging bij een opwarming van 2°C. In de simulaties om het effect van de

zeespiegelstijging in 2050 te bepalen is de grootste voorspelde verandering, dus 35cm zeespiegelstijging, gebruikt voor de verandering in de druk van de Noordzee.

Naast de stijging van de Noordzee is in het rapport van de Deltacommissie ook een voorstel gedaan voor het verhogen van de waterstand in het IJsselmeer om de verwachte klimaatverandering op te vangen. Deze plannen zijn meegenomen in de simulaties als een stijging van het peil in het IJsselmeer met 1m in 2050 en een stijging van het peil van de Markermeer met 0.5m.

Verandering in neerslag en verdamping

Klimaatverandering in de komende halve eeuw leidt volgens de voorspellingen tot veranderingen in neerslag en verdampingspatronen. Het KNMI heeft specifiek voor Nederland klimaatscenario's ontwikkeld die zowel de mondiale temperatuurstijging als de mate waarin de luchtstromingspatronen boven Nederland veranderen worden meegenomen. In deze studie worden de voorspellingen volgens het W+ scenario gebruikt. Dit is het scenario met een sterke wereldwijde temperatuurstijging van 2 °C en een verandering in de luchtstroming. Het laatste zorgt voor extra warme en natte winters, terwijl de zomers extra warm en droog zijn. Net als voor de zeespiegelstijging is in deze studie gebruik gemaakt van de meest recente scenario's: de KNMI '06 scenario's met de 2009 update. De verandering in de neerslag is bepaald met de klimaatgenerator van het KNMI (http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly). Hiermee zijn de neerslagreeksen van 2003 (een warm en droog jaar) en 2005 (een gemiddeld jaar) getransformeerd naar neerslagreeksen onder het W+ omstandigheden. De verdampingsreeksen zijn voor dezelfde jaren omgezet naar de verwachte verdamping in 2050 op basis van de percentuele veranderingen voorspeld onder het W+ scenario (tabel).



Figuur 2.30. Verandering in de temperatuur, neerslag en verdamping, volgens het KNMI '06 W+ scenario (uit Lenderink, 2006).

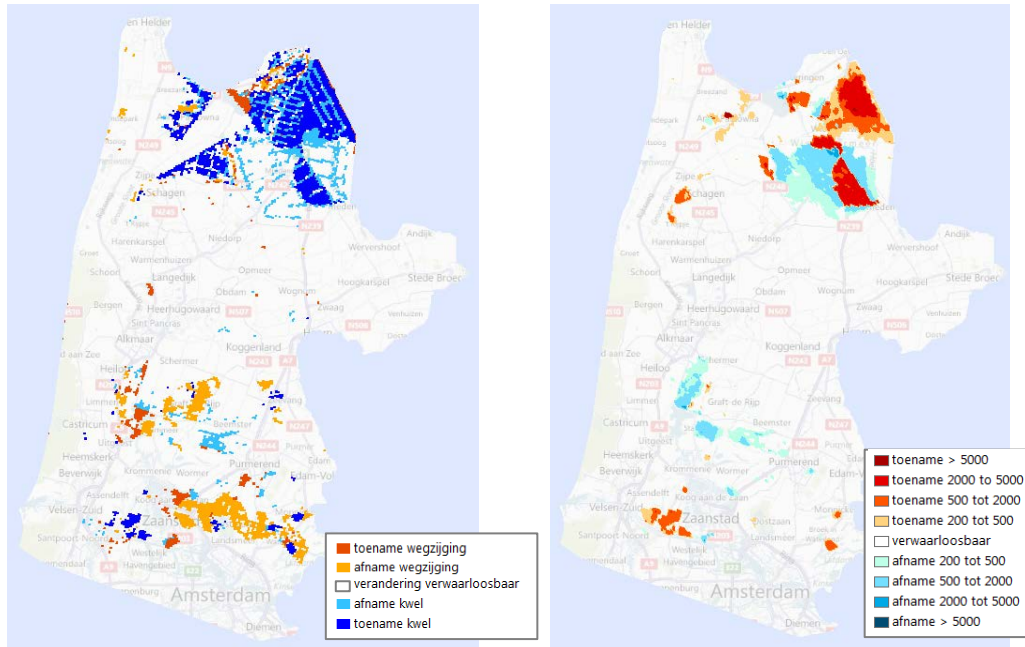
2.6.2 Vertaling naar verzilting

Bodemdaling

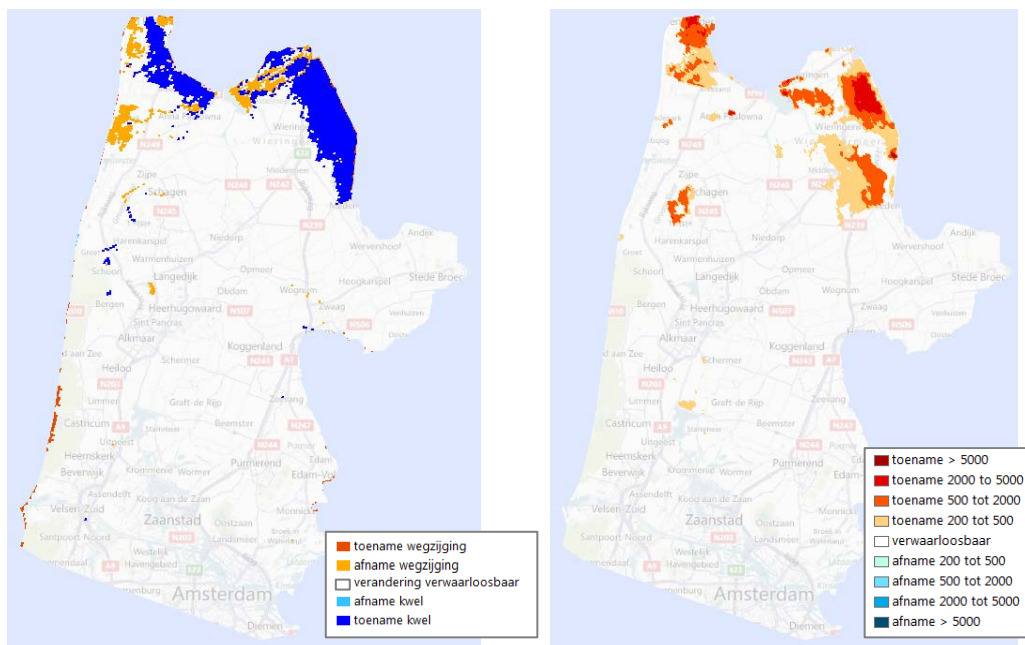
De bodemdaling in het gebied is niet gelijk verdeeld. Daardoor verandert de drukverdeling binnen het gebied en verleggen de kwelfluxen zich. Op de plaatsen waar de bodem sterk daalt neemt hierdoor de kwelflux toe. In gebieden die relatief weinig dalen neemt de kwelflux echter af (of de infiltratie toe) als het oppervlak in de omgeving wel een grote daling vertoont. Een effect op de zoutbelasting is uiteraard alleen van toepassing op plaatsen waar zich zout water in de ondergrond bevindt. Daardoor is de verandering in de zoutbelasting ten gevolge van bodemdaling beperkt tot een klein deel van het gebied (Figuur 2.31).

In de sterk dalende delen van de Wieringermeer, waar de bodemdaling meer dan 20cm en soms zelfs meer dan 30cm bedraagt wordt een sterke toename van de zoutbelasting gevonden. Deze kan zeer fors zijn met meer dan 5000 kg/jr/ha. In de delen van de Wieringermeer die minder snel dalen, met een bodemdaling van 5-10cm in 2050, neemt de zoutbelasting echter af. Hier is de kwelflux verkleind omdat de omgeving sneller zal

dalen. In de Schermer daalt de bodem nauwelijks en is het effect van de bodemdaling dan ook relatief klein. Het belangrijkste effect is een verkleining van de zoutbelasting in het zuiden van de Schermer, waar de kwelflux vanuit het Alkmaardermeer afneemt in vergelijking met de huidige situatie. Dit is wederom het gevolg van de grotere daling van de omgeving, waardoor de flux vanuit het Alkmaardermeer zich over een groter gebied verspreidt.



Figuur 2.31. Verschil in de gesimuleerde zoutbelasting 2005-2050 in de zomersituatie ten gevolgen van de voorspelde bodemdaling. Links de berekende verandering van kwel en wegzijing, rechts de verandering van zoutbelasting (in kg/ha/jr).



Figuur 2.32. Verschil in de gesimuleerde zoutbelasting 2005-2050 in de zomersituatie ten gevolgen van de voorspelde zeespiegelstijging. Links de berekende verandering van kwel en wegzijing, rechts de verandering van zoutbelasting (in kg/ha/jr).

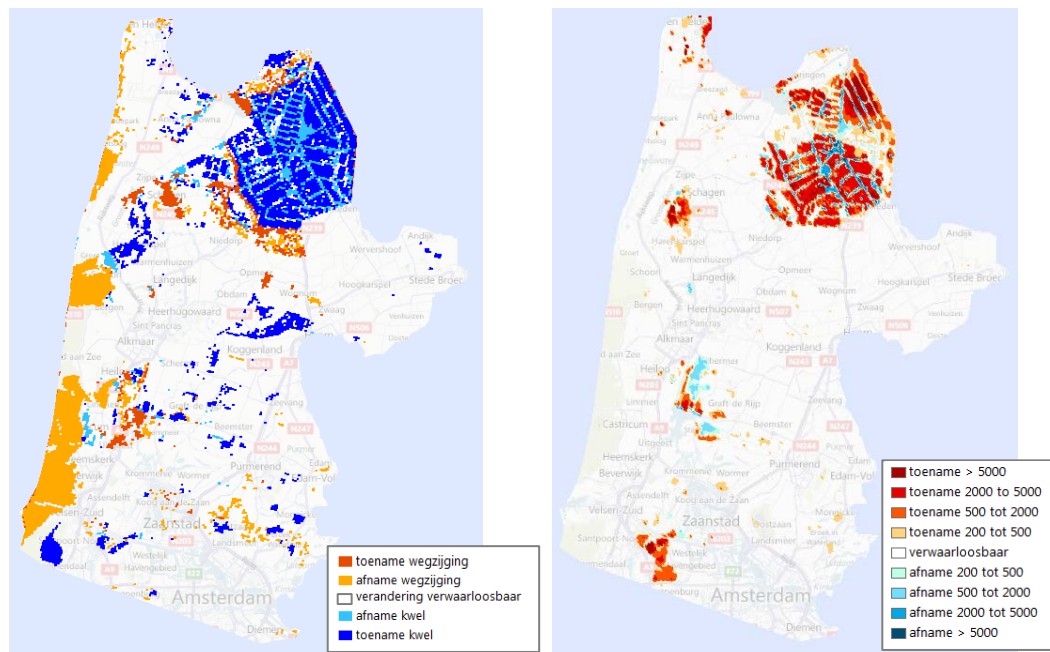
Zeespiegelstijging

Veranderingen in de kwelflux ten gevolge van zeespiegelstijging beperkt zich tot een relatief smalle band aan de kust van minder dan 10km. Dit is in lijn met eerdere studies die lieten zien dat het effect van de zeespiegelstijging op de stijghoogte van het grondwater gering is (Kwadijk et.al., 2007). In de gebieden aan de kust kan het echter een belangrijke factor zijn in de zoutbelasting. Aan de noordkant van de provincie wordt op twee plaatsen een prominente toename van de zoutbelasting voorspeld. Dit is in de noordpunt nabij Den Helder en aan de noordoostkant in de Wieringermeerpolder. Deze laatste locatie valt samen met de plek waar ook een vergroting van de kwel en de zoutbelasting wordt verwacht door de bodemdaling. Deze twee processen versterken elkaar omdat beide zorgen voor een vergroting van het verschil tussen de stijghoogte van het IJsselmeer en de polder. Deze combinatie maakt de noordoost kant van de Wieringermeerpolder een hotspot voor de toename van de zoutbelasting in 2050.

Neerslagoverschot

Het effect van de veranderingen in het neerslagoverschot in de zoutbelasting bestrijkt het grootste gebied in vergelijking met de twee bovengenoemde autonome ontwikkelingen. Het grootste effect van de verandering in neerslag en verdamping wordt tijdens het groeiseizoen verwacht. In Figuur 2.33 zijn daarom de veranderingen in de zomersituatie getoond. Als slechts naar het jaargemiddelde zou worden gekeken zou het effect namelijk worden onderschat, omdat de klimaatverandering leidt tot een sterke toename van het neerslagtekort in de zomer.

Wederom is het effect in de Wieringermeerpolder het grootst, terwijl ook veranderingen worden gevonden aan de zuidkant van de Schermer, ten zuiden van Schagen en aan de zuidkant van het gebied. In tegenstelling tot bodemdaling en zeespiegelstijging zal deze autonome ontwikkeling overal effect sorteren waar ook nu zoutbelasting optreedt.



Figuur 2.33. Verschil in de gesimuleerde zoutbelasting 2005-2050 in de zomersituatie ten gevolgen van de voorspelde verandering in het neerslagoverschot. Links de berekende verandering van kwel en wegzijging, rechts de verandering van zoutbelasting (in kg/ha/jr).

Uit de analyse van de resultaten van het detailmodel blijkt dat de verandering van de kwel flux door een ander neerslag en verdampingspatroon varieert op een kleine ruimtelijke schaal. Zelfs binnen een perceel vindt zowel toename als afname van de kwel en daarmee van de zoutbelasting plaats. Dit kan niet worden gesimuleerd met het gebiedsdekkende model dat een resolutie heeft van 250m. De resultaten van het gebiedsdekkende model geven wel een betrouwbare indicatie van de plaatsen waar de zoutbelasting zal veranderen ten gevolge van de verandering in het neerslagtekort (Figuur 2.33). Maar voor de simulatie van de grootte en zelfs de richting van de verandering van de zoutbelastingsflux is een hogere resolutie nodig. Dit wordt verder beschreven in de resultaten van het detailmodel voor de Schermer.

2.7 Conclusies

Het brakke tot zoute grondwater in de ondergrond van het beheersgebied van HHNK dateert uit twee perioden uit het Holoceen: dat is de periode 7000 tot 4000 jaar BP, toen het westelijk deel van Nederland werd overspoeld door de stijgende zee na de laatste ijstijd. In het beheersgebied van HHNK is alleen het eiland Wieringen als Pleistocene opduiking nooit beïnvloed door de zee. Na deze periode sloot de kust zich ongeveer langs de huidige kustlijn en begon het grondwater in het achterland van boven te verzoeten. Na 800 AD brak de zee door de zandwallen heen, erodeerde het veen en verzilte delen achter de kustlijn en de kop van Noord Holland. Dit proces werd versterkt door de ontwatering en bodemdaling en veenwinning en veenerosie. Het gebied omsloten door de Westfriese ringdijk werd gevrijwaard van deze hernieuwde invloed van de zee. Rond 1500 AD bestond een groot deel van het beheersgebied uit plassen en wateren die in verbinding stonden met de Zuiderzee en Waddenzee en derhalve zout waren. In deze periode van 800 tot 1500 AD verzilte het grondwater dus weer in delen van het gebied. Toch begon men vanaf 1300 al terrein te winnen op de zee door aandijking. Na 1600 AD werden successievelijk plassen en delen van de Zuiderzee drooggelegd en ingepolderd. De invloed van brak oppervlaktewater was daarmee geheel uitgebannen en het verzoetingsproces hervatte zich weer. Echter de diepe droogmakerijen brachten ook diepe grondwaterstromen op gang, die vooral in de centrale delen kwel van het zich daar bevindende brakke grondwater tot gevolg hadden. In die diepe polders (vooral Zuid-Schermer en Wieringermeer) manifesteren zich nu de hoogste zoutbelastingen van het watersysteem van HHNK.

Aan de hand van ruim 5000 grondwateranalyses en 900 geofysische sonderingen (VES) is het patroon van zoutgehalten in kaart gebracht. Dat heeft geresulteerd in chloridekaarten voor het gehele beheersgebied (grensvlakken van 1000, 5000 en 10000 mg/l). De analyses en chloridekaarten (Figuur 2.12) bevestigen en illustreren de hier geschetste historische ontwikkeling. Duidelijk zichtbaar is het van oudsher beschermde gebied van de Westfriese ringdijk waar grondwater tot 50 a 100 m zoet is. Ook onder de duinen heeft zich een dergelijke diepe zoetwaterbel gevormd, maar dat is het gevolg van een recente grondwateraanvulling na de vorming van de jonge duinen rond 1000 AD. Brak grondwater op geringe diepte achter de strandwalgordel tussen Schagen en Beverwijk en in de kop van Noord-Holland getuigt van de zeedorbraken en erosie in de periode na 800 AD. In veel gevallen is hierdoor het oude zoete grondwater geheel verdwenen. In een aantal gebieden (westelijk deel Wieringermeer, Alkmaar, Volendam) treffen we zogenaamde inversies aan. Daar heeft zoet grondwater zich weten te handhaven onder beschermende kleilagen (Eemklei). In de droogmakerijen en de IJpolders wordt grondwater met gehalten van 5000 mg/l op enkele meters diepte aangetroffen. Naast de mariene invloed tijdens de Middeleeuwen heeft dit vooral te maken met de kwel van grondwater, die het zoet-brak grensvlak omhoog heeft getrokken.

Op basis van de ondiepe chloridegehalten en met een grondwatermodel berekende kwel is de zoutbelasting berekend in het beheersgebied van HHNK. Omdat de hydraulische weerstand van de bovenste lagen in de ondergrond bepalend zijn voor die kwel, is een gedetailleerde deklagenkaart gemaakt. Het grondwatermodel omvat het gehele gebied van HHNK (celgrootte 250 m). Voor de Schermer en de Wieringermeer zijn detailmodellen gemaakt (celgrootte 100 m). Het grondwater is gekalibreerd op grondwaterstijghoogten en gevalideerd met chloridekaarten van het oppervlaktewater. Aanbevolen wordt om het model ook te kalibreren op waterbalansen van polders, zoals wel is gedaan voor de Wieringermeer en de Schermer.

De berekeningen hebben geresulteerd in en kwel/infiltratie- en zoutbelastingskaarten (Figuur 2.26 en Figuur 2.27). Hoge kwelfluxen en zoutbelastingen komen voor in de droogmakerijen. Wieringermeer, Schermer en de polder ten zuiden van Grafdijk springen eruit met zoutbelastingen van meer dan 15000 kg/ha/jr.

Hoewel het buiten het kader van dit onderzoek valt, merken we op dat het grondwatermodel ook kan worden toegepast om de natuurlijke belasting van nutriënten uit kwel te berekenen. Deze belasting kan aanzienlijk zijn. Een regionaal beeld hiervan voor het beheersgebied van HHNK is van belang voor het ontwikkelen van KRW strategieën.

Met het model zijn ook de gevolgen berekend van de autonome ontwikkelingen bodemdaling, zeespiegelstijging en verandering in het neerslagtekort op de zoutbelasting. In het grootste gedeelte van het beheersgebied zal de bodem slechts in geringe mate (5 tot 10 cm) zijn gedaald in 2050. Grotere dalingen doen zich voor in de veenweidegebieden ten noorden van Amsterdam en jonge polders zoals de Wieringermeer en de Anna Paulownapolder (tot 50 cm). Echter aanzienlijke toename van de zoutbelasting met 2500 tot 5000 kg/ha is beperkt tot de Wieringermeer. De verwachte zeespiegelstijging (en ook stijging van IJsselmeerpeil) in het jaar 2050 is 20 tot 35 cm. De effecten op het grondwater blijven beperkt tot een zone van 10 km langs de kust. De berekeningen laten alleen een significante toename zien van de zoutbelasting (2500 tot 5000 kg/ha/yr) bij Den Helder en langs de oostzijde van de Wieringermeer.

De verwachte toename van het neerslagtekort in de zomer leidt tot een toename van verzilting in polder met brakke kwel. Ook hier is het weer de Wieringermeer waar toenames van 2500 tot 500 kg/ha/jr zijn berekend. Verder zijn er nog enkele geïsoleerde locaties met aanzienlijke toename in zoutbelasting.

Het is duidelijk dat de zoutbelasting in de Wieringermeer en de kop van Noord Holland in het algemeen het meest zal toenemen als gevolg van de autonome ontwikkelingen. In de rest van het beheersgebied lijkt de effecten geringer. Daarbij moet de kanttekening geplaatst worden dat in gebieden met weinig zoutbelasting onder de huidige omstandigheden de relatieve toename in de toekomst groot kan zijn. Het is denkbaar dat er dan toch additionele beheersmaatregelen nodig zijn. Het verdient daarom aanbeveling de gevolgen van de verandering van de zout- en nutriëntenbelasting voor de oppervlaktewaterkwaliteit te onderzoeken.

3 SYSTEEMANALYSE OP PERCEELSNIVEAU

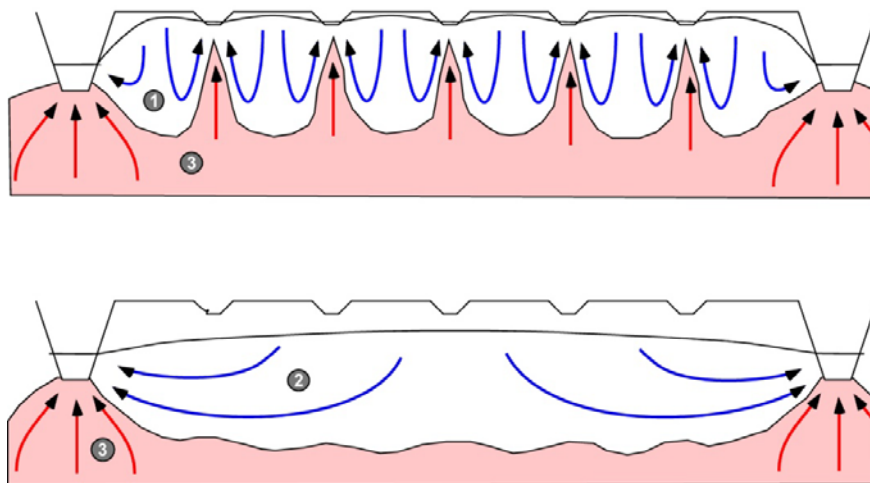
3.1 Inleiding

In overleg met het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) zijn twee gebieden geïdentificeerd voor detailonderzoek. Het betreft de Wieringermeer en de Schermer. De Schermer is representatief voor een diepe polder en daarmee geschikt voor onderzoek aan water- en stofstromen op lokale schaal en het ontwikkelen van de opschalingsmethodiek. De Wieringermeerpolder is een gebied met complexe problematiek met directe kennisvragen vanuit HHNK.

Doelstelling is op lokale schaal een verbeterd inzicht te krijgen in de processen en waterstromen in het landelijk gebied. De kennis op dit detailniveau leidt tot een beter inzicht in de stromingspatronen onder een polder, op perceelsniveau en over de herkomst van de zoute kwel in de sloten. Binnen de systeemanalyse van de detailgebieden nemen de veldmetingen een belangrijke plaats in. De systeemanalyse omvat zowel gebeurtenissen op perceelschaal alsook op polderschaal. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de veldmetingen op perceelschaal weergegeven.

3.2 Eerder onderzoek en doelstelling

De afgelopen duizend jaar is het ontwateren van moerassen en polders in Nederland bijna tot kunst verheven. Kwamen ontwerpregels en materialen eerst proefondervindelijk tot stand, later werden ze gerationaliseerd door Wageningse ingenieurs, die daarvoor tal van drainageformules ontwikkelden. Hiermee konden grondwaterstanden en afvoeren worden berekend voor allerlei configuraties van drainagemiddelen als sloten, greppels en drains (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1978, De Zeeuw & Hellinga, 1958, Krayenhoff van de Leur, 1958). Hoe kunstmatig deze drainagesystemen ook zijn, de opgewekte grondwaterstromen gedragen zich volgens de ordeningsregels van natuurlijke grondwaterstromingssystemen, zoals beschreven door Toth (1963). Freeze and Witherspoon (1990) en Engelen and Jones (1986). Grondwaterstromingssystemen zijn dynamische lichamen van stroombanen, die uit een bepaald infiltratiegebied komen of uitmonden in een bepaalde kwelzone. Dit is uitgewerkt voor Nederland in de Vries (1974) en (Engelen en Kloosterman, 1996). De Vries (1974) integreerde de Wageningse drainageformules in dit concept. Deze systeembenadering passen we ook toe in dit onderzoek.



Figuur 3.1. Conceptueel model van grondwaterstroming in een perceel. (1) Drainage systeem, (2) Perceel systeem and (3) Regionaal systeem

In een polders als de Schermer en de Wieringemeer maakt het kwelwater deel uit van een diep regionaal systeem, dat aangedreven wordt door grondwatervoeding in verder weg en hoger gelegen gebieden. Het kwelwater, vaak gemineraliseerd of zelfs brak, stroomt gestaag uit in de watergangen en ook in de drains. Op het kwelwatersysteem ligt een ondiep systeem, dat wordt gevoed door infiltrerende neerslag op de percelen. Dit zoete water stroomt ook richting de watergangen. Dit perceelssysteem is meer dynamisch en kan in de zomer uitgeput raken als voeding afwezig is of zelfs grondwater wordt verdampt door gewassen. Bij hoge grondwaterstanden kunnen ook drains en greppels water gaan afvoeren naar de watergangen. Er ontstaan dan tijdelijk kleine grondwaterdrainagesystemen, die weer zijn gesuperponeerd op het perceelssysteem. Het zoete grondwaterlichaam van de beide laatste systemen vatten we samen onder de regenwaterlens. De lens vormt in feite de tijdelijke berging van de geïnfilteerde neerslag op de percelen.

Verschillende onderzoekers hebben reeds onderzoek gedaan naar het gedrag van de neerslaglens (Poot en Schot 2000 en Schot et al, 2004 en Van der Wal, 2001). A. Poot en P. Schot (2000) beschrijven de dynamiek van de neerslaglens, met verschillende methoden, met betrekking op seizoensvariatie. In de winter is de berekende neerslaglens het dikst omdat er dan sprake is van een neerslagoverschot in tegenstelling tot de zomer. Daarbij reageert in deze simulaties de grondwaterstand sneller op veranderingen in het neerslagoverschot dan het grensvlak tussen het neerslagwater en het diepe grondwater. In hun artikel met S.C. Dekker (2004) blijkt dat ook bij een zeer hoge opwaartse kweldruk een regenlens kan ontstaan tot een diepte van 1,1m. Daarnaast berekenen ze dat seizoenale neerslagfluctuaties nauwelijks effect heeft op de diepte van het grensvlak. Terwijl de variatie in droge en natte jaren een grotere invloed heeft op de ligging van het grensvlak. Verder wordt bij percelen met greppels alleen naast de sloten een neerslaglens berekend. Het grondwater wat bij de greppels het maaiveld bereikt wordt via oppervlakteafoer afgevoerd. Volgens de toegepaste methode van Immerzeel (1996) treedt dit het eerst en het langst op in het midden van het perceel, wat ervoor zorgt dat er geen dikke neerslaglens kan ontstaan.

Al deze onderzoeken hebben gemeen dat het kwantitatieve aspecten betreft en gebruik is gemaakt van analytische oplossingen en modelsimulaties, ofwel een theoretische beschouwing betreft. De modeluitkomsten zijn ook niet geverifieerd of gekalibreerd op basis van veldmetingen. Daarnaast valt op dat drainagemiddelen geen grote rol speelden in deze beschouwingen.

De aandelen van afstroming uit de brakke kwel en de perceels- en drainagesystemen veranderen in de tijd, zodat ook de zoutgehalten in de watergangen fluctueren. Het seizoenale beeld is dat het relatief lage zoutgehalte van de winterperiode in de loop van voorjaar en zomer geleidelijk toeneemt om dan vrij snel weer te dalen vanaf augustus (A. Poot en P. Schot, 2000). Regenperioden kunnen echter leiden tot sterke schommelingen, die gesuperponeerd zijn op dit beeld. Onze hypothese is dat de perceelsdrainage een bepalende rol speelt in de ruimtelijke variatie van zoutgehalten van het ondiepe grondwater maar ook in de variatie in de tijd van zoutgehalten van het oppervlaktewater.

Voor dit onderzoek zijn uitgebreide veldmetingen uitgevoerd om de zoutgehalten in het grondwater en daarmee de regenwaterlens in beeld te brengen. Dat is gedaan op percelen met verschillende drainagemethoden (greppels en drains). Het doel is het concept van de grondwatersystemen te staven en systeemkenmerken te bepalen. Daarbij is ook gebruik gemaakt van de resultaten uit het onderzoek "Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland" dat wordt uitgevoerd in Friesland en Groningen (Acacia Water, 2011).

3.3 Meetmethoden

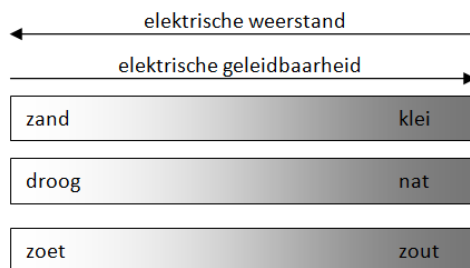
Bij het veldonderzoek zijn verschillende meetmethoden toegepast. De één op regelmatige basis, de ander continu en enkele eenmalig. Alle meetmethoden worden hieronder beschreven en nader toegelicht.

3.3.1 Geofysische metingen [Algemeen]

Met geoelectrische meetmethoden wordt de elektrische geleidbaarheid of weerstand van de ondergrond gemeten. De geleidbaarheid is de reciproke van de weerstand. Afhankelijk van de meetmethode wordt de gemeten waarde in geleidbaarheid of weerstand uitgedrukt. De gemeten waarde wordt bepaald door de weerstand (of geleidbaarheid) van de bodemsoort, het vochtgehalte en het zoutgehalte van het grondwater. Elke methode heeft voor- en nadelen qua meetbereik, dieptebereik, resolutie, tijd die nodig is voor het uitvoeren van een meting en ten slotte de interpretatiewijze (software).

Schijnbare en specifieke formatieweerstand

Een geoelectrische meting aan het oppervlak resulteert in een zogenaamde schijnbare weerstand. Deze schijnbare weerstand is een gemiddelde van de specifieke weerstand van verschillende bodemlagen vanaf het maaiveld tot de maximaal gemeten diepte (meetbereik). Bij een homogene bodem (en homogene samenstelling van het grondwater) is de schijnbare weerstand gelijk aan de specifieke weerstand. Door de elektrodenafstand te variëren bij Direct Current methoden zoals VES en CVES of door de tijdsvariatie te meten bij TDEM methode zoals Skytem kan met behulp van interpretatiesoftware toch de werkelijke specifieke of formatieweerstand worden bepaald. Geofysische metingen in boorgaten geven direct informatie over de formatieweerstand.



Figuur 3.2 Invloed bodem en grondwatereigenschappen op geleidbaarheid en weerstand.

Formatieweerstand en waterweerstand

De gemeten of geïnterpreteerde formatieweerstand geeft de weerstand weer van de ondergrond en het poriewater. In algemeen geldt dat een lage weerstand overeenkomt met ofwel klei/veen, zout poriewater of een combinatie daarvan. Een hoge weerstand komt overeen met zand, zoet water of een combinatie. Zand met zout poriewater geeft dus een lagere weerstand dan zand met zoet water (geïllustreerd in Figuur 3.2). Voor een juiste interpretatie van de resultaten van weerstandsmetingen is vaak aanvullende informatie nodig. Vaak is dat al aanwezig (bijvoorbeeld DINOloket) maar ook kan het nodig zijn de meting uit te voeren in combinatie met grondboringen (grondwaterstand en bodemopbouw), EC metingen van het grondwater en hoogtemetingen (vanwege evt. hoogteverschillen).

De hier beschreven methode is gebaseerd op de wet van Archie (vgl 3.3) die de relatie tussen formatie- en waterweerstand aangeeft. Hieruit kan de waterweerstand worden afgeleid als de formatiefactor bekend. Deze factor wordt bepaald door de lithologie. Door toepassing van een empirische relatie tussen waterweerstand en chloridegehalte kan uit de gemeten formatieweerstand een indicatie worden gegeven over het chloridegehalte van het grondwater in de zandpakketten.

Opgemerkt wordt dat sommige geofysische meetmethoden (VES, CVES boorgatmeting) de meetwaarden uitdrukken in elektrisch weerstand. Anderen meetmethoden hanteren elektrische geleidbaarheid als meeteenheid, wat de reciproken is van de weerstand. Voor water wordt meestal de geleidbaarheid in $\mu\text{S}/\text{cm}$ gebruikt. De weerstand ρ_w in Ohmm van water is gerelateerd aan de watergeleidbaarheid σ_w (EC) in $\mu\text{S}/\text{cm}$ volgens:

$$(3.1) \quad \sigma_w = \frac{10000}{\rho_f}$$

Vanwege de temperatuursafhankelijkheid dienen gemeten geleidbaarheden en weerstanden te worden geconverteerd naar een standaardtemperatuur van 20 °C met behulp van de hier gemodificeerde relatie van Jorgensen (1989):

$$(3.2) \quad \sigma_{f20} = \sigma_f \frac{75}{1.8T + 39}$$

waar σ_{f20} de standaard formatiegeleidbaarheid bij 20 °C, σ_f de gemeten formatiegeleidbaarheid en T de temperatuur is. De temperatuur op elke diepte kan worden afgeleid uit waarnemingen. Waar geen metingen beschikbaar zijn is een temperatuur (T) van 10 °C (Volker, 1962) aangenomen.

De formatiegeleidbaarheid σ_{f20} moet worden omgezet naar een watergeleidbaarheid σ_w met behulp van de formatiefactor F op basis van de volgende relatie (wet van Archie):

$$(3.3) \quad \sigma_{w20} = \sigma_{f20} * F$$

Er zijn wel enkele standaardwaarden voor de formatieconstante per bodemsoort beschikbaar die een indicatie geven (Tabel 3.1). Voor zover mogelijk dient de formatiefactor voor een bepaalde lithologische eenheid altijd bepaald te worden op basis van gemeten geleidbaarheid van een grondwatermonster.

Tabel 3.1. Enkele standaardwaarden voor de formatiefactor

| Lithologische beschrijving | Formatiefactor |
|----------------------------|----------------|
| grind met zand | 7 |
| grof zand met grind | 6 |
| grof zand | 5 |
| matig grof zand | 4 |
| zwak slibhoudend zand | 3 |
| matig slibhoudend zand | 2.5 * |
| sterk slibhoudend zand | 2 * |
| klei | 1 - 3 * |
| veen | ~ 1 |

* schijnbare formatie factor want voor kleilig sediment varieert F met de geleidbaarheid van het poriewater.

Volgens (3.3) dient dan de gemeten geleidbaarheid van het poriewater te worden gedeeld door de gemeten specifieke formatiegeleidbaarheid op de diepte van het poriewater. De specifieke formatiegeleidbaarheid kan zijn gemeten met de methoden VES, CVES of SkyTEM.

De watergeleidbaarheid σ_{w20} in $\mu\text{S}/\text{cm}$ kan vervolgens worden gebruikt om het chloridegehalte in mg/l te herleiden op basis van de empirische relatie van Post (2008),

die is gebaseerd op een groot aantal analyses van grondwater in Laag Nederland. Het bicarbonaatgehalte HCO_3 in mg/l speelt hierin ook een rol. De gevonden relatie ziet er als volgt uit:

$$(3.4) \quad \sigma_{w20} = 2.91 * 10^2 + 2.71 * Cl - 2.49 * 10^{-5} * Cl^2 + 9.34 * 10^{-1} * HCO_3$$

$$(3.5) \quad Cl = \frac{-2.71 + \sqrt{2.71^2 - (4 * 2.49 * 10^{-5} * (-\sigma_w + 291.81 + 0.93 * HCO_3))}}{2 * 2.49 * 10^{-5}}$$

De hier beschreven empirische relaties hebben uiteraard beperkingen. Zo geldt voor de relatie 3.5 dat deze toepasbaar is voor watergeleidbaarheden groter dan 800 $\mu S/cm$.

De relatie van Post is gebaseerd op analyses van het grondwater. Voor analyses in de deklaag op de percelen in de Schermer en Wieringermeer blijkt de relatie niet te voldoen. De reden hiervoor zijn de aangetroffen hoge sulfaatgehalten. Voor de meetpercelen is daarom gebruik gemaakt van een andere relatie (Stuyfzand, 1987):

$$(3.6) \quad \sigma_{w20} = 71.027 \left\{ 0.94 + 1.38207 \left(\frac{Cl^-}{35.453} \right) + \frac{SO_4^{2-}}{48.03} + \frac{NO_3^-}{62} + 0.95721 \left(\frac{HCO_3^-}{61.02} + \frac{CO_3^{2-}}{30.01} \right) \right\}$$

Ook voor deze relatie geldt dat de watergeleidbaarheid σ_{w20} is uitgedrukt in $\mu S/cm$. De concentraties zijn in mg/l. Voor het water in de percelen geldt verder dat alleen chloride, sulfaat en bicarbonaat bepalend zijn. Op basis van de metingen is verder de aanname gedaan dat het bicarbonaatgehalte 500 mg/l bedraagt. De relatie vereenvoudigt daarmee tot:

$$(3.7) \quad \sigma_{w20} = 71.027 \left\{ 1.38207 \left(\frac{Cl^-}{35.453} \right) + \frac{SO_4^{2-}}{48.03} + 8.7834 \right\}$$

Die kan worden omgezet naar een relatie waarmee het chloridegehalte kan worden bepaald:

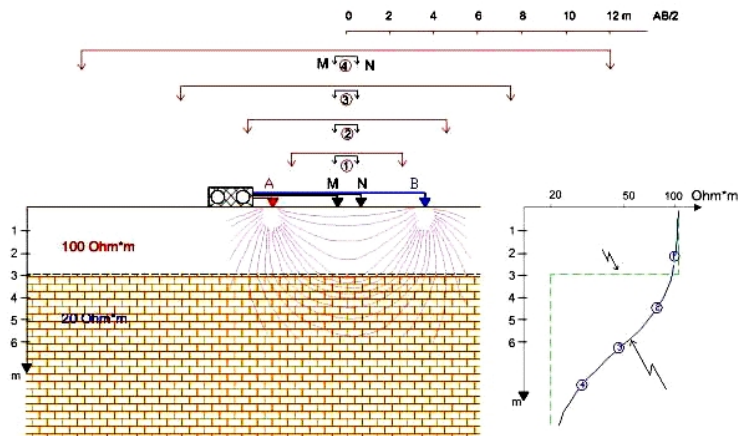
$$(3.8) \quad Cl^- = \left\{ \frac{\sigma_{w20}}{71.027} - \frac{SO_4^{2-}}{48.03} - 8.7834 \right\} / 0.038983$$

3.3.2 EM34: Electro-magnetische meting

Met de EM34 wordt de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond gemeten. Dit wordt gedaan door vanaf een zendspoel een wisselstroom de grond in te sturen zodat een primair magnetisch veld wordt opgewekt. Dit magnetische veld induceert kleine stromen in de ondergrond die weer een secundair magnetisch veld opwekken. Er is gebruik gemaakt van de Geonics EM-34 die voor drie verschillende afstanden (10, 20 en 40 meter) en de bijbehorende dieptes de geleidbaarheid in milli-Mho/meter geven. Wanneer meerdere metingen op rij worden uitgevoerd, geeft deze meting een eerste indruk van de variatie op het perceel.

3.3.3 VES: Vertical Electrical Sounding

Bij een VES meting (Vertical Electrical Sounding) wordt op één punt de schijnbare weerstand van de ondergrond gemeten. Dit wordt gedaan door tussen twee stroomelektroden een stroom door de ondergrond te sturen. Twee potentiaalelektroden ertussenin meten het potentiaalverschil. De afstand tussen de stroomelektroden wordt in stappen vergroot waardoor telkens over een andere diepte de schijnbare weerstand wordt gemeten.



Figuur 3.3. Schematische weergave van de meetopstelling van een VES (links) en de resulterende interpretatie in een lagenmodel (rechts) (bron http://www.georesearch.ro/geofizica_en.html).

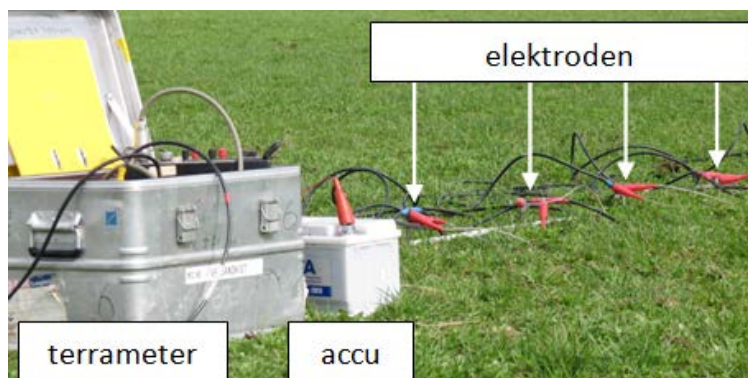
Op basis van het potentiaalverschil (V), de stroomsterkte (I) en een geometrische factor (G) (afhankelijk van de elektrodeafstand) kan de schijnbare weerstand (ρ_a) van de ondergrond worden berekend:

$$(3.9) \quad \rho_a = G * \frac{V}{I}$$

De schijnbare weerstand is het gemiddelde van de weerstand van verschillende bodemlagen vanaf het maaiveld tot op een bepaalde diepte (afhankelijk van de elektrodeafstand). De metingen zijn uitgevoerd met een ABEM Terrameter SAS 300B met toebehoren. De interpretatie naar lagenmodellen is uitgevoerd met behulp van het softwarepakket Schlumberger. Het resultaat is een lagenmodel van de formatieweerstanden op één punt.

3.3.4 CVES: Continuous Vertical Electrical Sounding

Een VES meting geeft een eendimensionaal beeld van de ondergrond. Voor een tweedimensionaal beeld van de ondergrond worden meerdere elektroden op rij geplaatst (Figuur 3.4), een zogenaamde CVES meting (Continuous Vertical Electrical Sounding).



Figuur 3.4 Meetopstelling CVES

Metingen met de mogelijke elektrodencombinaties zijn uitgevoerd door een ABEM SAS4000 Terrameter. Hierdoor wordt de elektrische weerstand op meerdere diepten en locaties over de raai gemeten. De resolutie en penetratiediepte zijn afhankelijk van de gekozen profiellengte en de daarmee vastgelegde elektrodeafstand. Er kan gekozen worden voor verschillende configuraties. Gekozen is voor hoge resolutiemetingen met de

zogenaamde de Schlumberger configuratie (ca. 750 metingen per profiel). Interpretatie door het softwarepakket RES2Dinv van GEOTOMO Software resulteert in een tweedimensionaal weerstandsbeeld van de ondergrond.

3.3.5 Prikstok

De prikstok is een metalen stok met aan het uiteinde sensoren voor het meten van de temperatuur (T) en de elektrische geleidbaarheid (EC) (Wirdum, 2004). Voor het meten is de WTW 3310 EC meter gebruikt die aan de prikstok wordt gekoppeld.



Figuur 3.5 Prikstokpunt en gebruik prikstok

Vanwege de verschillende manieren van meten tussen prikstok en EC-meter dient de prikstok-EC eerst nog vermenigvuldigd te worden met een correctiefactor die voor elke prikstok is bepaald met ijkvloeistoffen. Deze waarde is voor deze prikstok vastgesteld op 0.38.

De prikstok wordt op de gewenste plaats met de hand in de grond geduwd. Met behulp van de peilschaal die in de stok gegraveerd is wordt iedere 10 cm een EC en T waarde waargenomen en genoteerd. Elke keer dat de stok verder wordt geduwd moet 1 a 3 minuten gewacht worden om de EC en T waarden in te laten stellen. Aan de hand van deze gegevens worden de geleidbaarheidswaarden van het grondwater bepaald en in diepteprofiel uitgezet.

3.3.6 Monstername en analyse grondwater

Monstername

Voor het bepalen van de samenstelling van het grondwater zijn bodemmonsters genomen. Er zijn tussen twee drains of greppels steeds een aantal boringen uitgevoerd om monsters op verschillende dieptes te kunnen nemen. De boringen zijn gezet tenminste één in het midden tussen twee drains/greppels en één van de twee drains en aantal boringen daartussen.

De bodemmonsters zijn gestoken met een guts (diameter van 6 cm). Deze diameter is gekozen om op elke diepte voldoende bodemmateriaal te kunnen verzamelen. Het boorgat is steeds opgeschoond met een Edelman boor. Bij elke monstername is nauwkeurig de diepte bepaald van de bodemmonsters. In principe is elke 25 cm een monster genomen. Dit hebben we gedaan door met een gutsmes het materiaal op de gewenste diepte uit de guts te nemen. Het bodemmateriaal is in RVS monsterringen met



Figuur 3.6. In de koffer de monsterringen luchtdicht verpakt met tape.

plastic doppen bewaard. Om de monsters luchtdicht op te slaan zijn de ringen ingewikkeld met duct tape (Figuur 3.6). Tijdens de monsternamen is ook steeds een bodembeschrijving gemaakt.

Laboratoriumanalyses

In de laboratoria van de Vrije Universiteit is het grondwater uit de bodemmonsters geanalyseerd op de volgende elementen: EC, pH, kationen samenstelling, anionen samenstelling en zuurstof isotoopverhouding. Voordat het grondwater in de bodemmonsters geanalyseerd kon worden, moest eerst het water uit de bodemmonsters worden gehaald. Dit is gedaan door middel van centrifugeren waarbij de bodem en water van elkaar worden gescheiden. Hiervoor is de volgende procedure gevolgd:

De slingervaten voor de centrifuge gereinigd met demi-water en gedroogd. De slingervaten worden gevuld met bodem monster en voorzien van een microfilter. Vaten die tegenover elkaar staan in de centrifuge mogen niet meer dan 0,1 g in gewicht verschillen. Per vat gevuld tot circa 150 – 200 g per monster wat ca. 8 – 22 ml water opbrengt. Elk monster 30 minuten centrifugeren bij 3500 rpm. Bij weinig opbrengst van water is dit verhoogd tot 60 minuten. Na het centrifugeren wordt direct de EC en pH gemeten. Daarna zijn voor elk monster vier reageerbuisjes gevuld. In twee van deze buisjes is 1 ml van het grondwater gepipetteerd. Een klein flesje, met een inhoud van 2 ml, werd gevuld voor de zuurstofisotopen analyse. Het derde reageerbuisje werd gevuld met het restwater. De reageerbuisjes die we hebben gebruikt hebben een inhoud van 10 ml. De monsters en de reageerbuisjes zijn steeds in een koelkast opgeslagen.

Voordat de anionen en kationen analyses uitgevoerd konden worden, moesten het water eerst verdund worden om het meetbereik van de apparatuur niet te overschrijden. Voor



Figuur 3.7. Centrifuge waarmee de water uit de bodemmonsters is verkregen.

de anionen analyse is het monster verdund met het zuivere milli-Q water. Voor de kationen analyse zijn de monsters verdund met 0,01M HNO₃ water. De monsters werden zover verdund dat de 10 ml buisjes bijna vol zaten. Elk buisje is drie keer gewogen. Eerst werd het lege buisje gewogen, daarna het buisje met het monster en als laatste het

buisje met het monster en de verdunning. Alle gewichten zijn genoteerd om naderhand de verdunningsfactoren te kunnen berekenen. Voor sommige monsters bleek het nodig om voor de anionenanalyse nog verder verdund te worden. Deze zijn na de eerste verdunning nog eens met een factor 10 verdund.

De anionen analyses zijn uitgevoerd met behulp van een ionchromatograaf en een aquakem. De concentraties van de volgende anionen zijn gemeten: fluoride, chloride, bromide, nitraat, sulfaat en bicarbonaat. Alle anionen, behalve bicarbonaat, zijn gemeten met de ionchromatograaf. De concentratie bicarbonaat is gemeten met de aquakem. De ionchromatograaf is volledig automatisch aangestuurd door een computer. De chromatogrammen werden door de computer geanalyseerd en waar nodig handmatig bijgewerkt. Daarna konden de gemeten concentraties, aan de hand van de verdunningsfactoren, worden omgerekend naar de werkelijke concentraties in het grondwater. De bicarbonaat analyse is ongeveer twee weken later uitgevoerd dan die van de andere anionen. Voor deze analyse hoeft het water niet handmatig verdund te worden, omdat het apparaat volledig automatisch een verdunningsreeks aanmaakt.

De kationen analyse is uitgevoerd met behulp van een ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer). In een ICP-OES wordt een plasma gemaakt, waarvan de energie wordt geleverd door elektrische stromen die geproduceerd worden door elektromagnetische inductie. Dit wordt 'inductively coupled plasma' (ICP) genoemd. Dit plasma wordt gebruikt om de atomen van het monster in een aangeslagen toestand te brengen. Zodra het atoom zich herstelt, zendt het een soort straling uit. Elk atoom heeft zijn eigen karakteristieke golflengte. De intensiteit van deze straling is een maat voor de concentratie van het element in het monster. De concentraties van de volgende elementen zijn met deze methode gemeten: natrium, kalium, calcium, magnesium, ijzer, mangaan en aluminium.

De zuurstof isotoopverhouding analyse is uitgevoerd met de TC/EA (High Temperature Conversion Elemental Analyzer) van Thermo. De reactor van de TC/EA bestaat uit een glasachtige koolstof buis met een glasachtige koolstof vulling. Dit zorgt ervoor dat zowel het monster als de reactiegassen niet in contact kunnen komen met zuurstofhoudende oppervlakken. De temperatuur in de reactor is ongeveer 1400 °C. Bij deze hoge temperatuur valt het water van het monster uiteen in waterstof en zuurstof. Het zuurstof verbindt in de reactor met koolstof, waardoor CO ontstaat. Dit gas wordt vervolgens door de massaspectrometer geanalyseerd op isotoopverhoudingen.

3.3.7 Hooghoudtproef : Bepaling doorlatendheid (k-waarde)

Om de doorlatendheid (k-waarde) van de bodem te bepalen wordt een Hooghoudtproef uitgevoerd. Hiervoor wordt een boorgat tot onder de grondwaterspiegel geboord. Het water wordt in één keer uit het gat verwijderd en met een regelmatig tijdsinterval wordt het verloop van de grondwaterstand gemeten. Uit de snelheid waarmee het grondwater omhoog komt kan de doorlatendheid van de ondergrond berekend worden (Van Beers, 1979). De doorlatendheid van de bodem is van belang voor de perceelsmodellering. De k-waarde bepaalt hoe snel de grondwaterstand reageert op veranderingen (in oppervlaktewater, drains, greppels) en neerslag.

3.3.8 Divers (automatische druk-, geleidbaarheid- en waterstandopnemers)

Voor de continue meting van (grond)waterstanden, EC waarden en temperatuur is gebruik gemaakt van divers (Schlumberger). Deze divers meten met een bepaalde ingestelde frequentie en slaan dit op. Met behulp van een kabel en laptop kunnen de divers in het veld worden uitgelezen (Figuur 3.8). Er zijn verschillende typen divers toegepast.

Barodiver

De Barodiver meet (lucht)druk en temperatuur. Voor de luchtdruk is de nauwkeurigheid ongeveer 0.3% van de volle uitslag en de resolutie 0.1 cm H₂O. Voor de temperatuur is de nauwkeurigheid 0.1 °C en de resolutie 0.01 °C. Er is gemeten met een meetfrequentie van 5 en/of 10 minuten.

De Barodiver is gebruikt om de gemeten waterdruk te compenseren voor de luchtdruk. De Barodiver is geïnstalleerd op een droge plaats in de nabijheid van de andere divers.



Figuur 3.8 Uitlezen diver in het veld.

Micro- of Mini-diver

De Micro – of Mini-diver meet (water)druk en temperatuur. Voor de luchtdruk is de nauwkeurigheid ongeveer 0.05% van de volle uitslag en de resolutie 0.2 cm H₂O. Voor de temperatuur is de nauwkeurigheid 0.1 °C en de resolutie 0.01 °C. Er is gemeten met een meetfrequentie van 5 en/of 10 minuten. De Micro – of Mini-diver is gebruikt om grondwaterstanden te meten. Hiervoor is de diver op de gewenste diepte in een peilbuis gehangen.



Figuur 3.9 CTD-divers in watergangen

CTD-diver

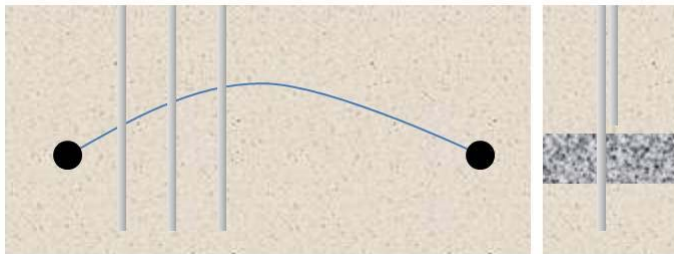
De CTD-diver meet (water)druk, temperatuur en elektrische geleidbaarheid (EC). Voor de luchtdruk is de nauwkeurigheid ongeveer 0.1% van de volle uitslag en de resolutie 0.2 cm H₂O. Voor de temperatuur is de nauwkeurigheid 0.1 oC en de resolutie 0.01 oC. Voor de elektrische geleidbaarheid is de nauwkeurigheid 1% van de gemeten gegevens en de resolutie 0.1% van de gemeten gegevens. Er is gemeten met een meetfrequentie van 5 en/of 10 minuten. De CTD-diver is voornamelijk gebruikt om de oppervlaktewaterstanden en geleidbaarheid van het oppervlaktewater te meten. Hiervoor is de CTD-diver in een peilbuis gehangen die aan een paal in een watergang is gebonden (Figuur 3.9).

3.3.9 Grondwaterstanden

De grondwaterstand geeft inzicht in bodemeigenschappen en de processen in de ondergrond. Van belang is de ruimtelijke variatie in de grondwaterstand (bijvoorbeeld opbolling tussen drains) en de temporele variatie (reactie op neerslag en verdamping).

Grondwaterstanden worden gemeten door het plaatsen van peilbuizen met een filter op de gewenste diepte. In deze peilbuizen kan vervolgens een diver worden gehangen voor automatische metingen of er kan met regelmaat een handmeting worden uitgevoerd.

De variatie van de grondwaterstand tussen ontwateringsmiddelen wordt gemeten door de locaties van de peilbuizen op regelmatige afstanden tussen drains/greppels of vanaf een watergang te kiezen. Gegevens over stijghoogteverschillen tussen twee lagen worden verkregen door peilbuizen op verschillende dieptes te plaatsen. Het verschil in gemeten waterhoogte tussen een diepe en een ondiepe peilbuis in combinatie met de doorlatendheid van de bodemlaag tussen de twee peilbuizen wordt gebruikt om de kweldruk te berekenen.



Figuur 3.10 Meten grondwaterstand (links) en stijghoogteverschil (rechts).

3.3.10 Perceelafvoer

De afvoer van een perceel geeft inzicht in de processen in de ondergrond. Afvoer vindt plaats middels drains of greppels. Voor gedraineerde percelen gaat het grootste gedeelte van de perceelafvoer via de drains, voor begreppelde percelen gaat dit via de greppels die uitkomen op een zogenaamde collectordrain. De totaalafvoer van een perceel komt uit in de watergang, die vervolgens weer in verbinding staat met het waterlopenstelsel in de polder. In de volgende paragrafen worden de meetmethoden aan drainafvoer, greppelafvoer en (totaal)perceelafvoer besproken.



Figuur 3.11 Meten aan drainafvoer; 1. Drainbuis; 2. Zandvang; 3. Uitstroomopening; 4. Diver.

Drainafvoer

Om gegevens over de drainafvoer te verkrijgen is met PVC een constructie op de drains gezet waarin een CTD-diver is gelegd. De constructie is zo gemaakt dat er een minimale opstuwing plaatsvindt en toch de sensor van de CTD-diver volledig in het water ligt. Een zandvang zorgt ervoor dat de ruimte waar de diver ligt niet vol raakt met zand of ander afgevoerd materiaal.

Door de gegevens van de CTD-diver te combineren met gegevens van de Barometerdiver en een CTD-diver in de sloot kan worden bepaald of er afvoer plaatsvindt vanuit de drain en wat het chloridegehalte van het drainwater is. De barometergegevens worden gebruikt om vast te stellen of de drain droog staat. De drain staat droog wanneer temperatuur en druk gelijk zijn aan de buitenlucht. De gegevens van de CTD-diver in de sloot worden gebruikt om vast te stellen of er geen slootwater in de drains komt (bijvoorbeeld door een hoger slootpeil).

Greppelafvoer

Om gegevens van de greppelafvoer te verkrijgen is een CTD-diver in de collectordrain gelegd. De meetprocedure komt verder overeen met dat van een drain. Door de gegevens van de CTD-diver te combineren met gegevens van de Barometerdiver kan worden bepaald of de collectordrain afvoert. De barometergegevens worden gebruikt om vast te stellen of de collectordrain droog staat.

Perceel/Slootafvoer

De totaalafvoer van een perceel is gemeten door een schot met V opening te plaatsen met aan de bovenstroomse kant een CTD-diver. De relatie tussen waterhoogte en afvoer (de zogenaamde Q-h relatie) voor het schot is bekend en wordt gebruikt voor de berekening van de afvoer (Boiten, 2003):

$$(3.7) \quad Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2 * 9.81} * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * h^{2.5}$$

Waarin Q de afvoer [m³/s] is, C_d de afvoercoëfficiënt, α de hoek van de V vorm en h de waterhoogte boven punt V vorm [m].



Figuur 3.12 Schot in sloot met ctd-diver (Wieringermeer, perceel Visser).

3.3.11 Neerslag en verdamping

Neerslag kent een sterke ruimtelijke variatie. Er is daarom in elke polder nabij de meetpercelen een regenmeter geplaatst. Er is gebruik gemaakt van de e+ RAIN datalogger met kunststof regenmeter van Eijkelkamp. Er is gemeten met een frequentie van 10 minuten waarbij de neerslagsom worden opgeslagen.

De regenmeter werkt volgens de 'tipping bucket' methode die 1 puls geeft per 0.2 mm. De regenmeter heeft een oppervlak van 507 cm² en een hoogte van 34 cm. De regenmeter is op een standaard geplaatst, zodat de hoogte van de opening op ongeveer 1 meter boven maaiveld is.

Voor de verdamping is aangenomen dat de ruimtelijke variatie minder sterk is. Voor de verdampingswaarden is gebruik gemaakt van de metingen van nabij gelegen neerslagstations van het KNMI.



Figuur 3.13 Regenmeter op het perceel in de Wieringermeerpolder

3.4 Uitwerking en resultaten veldonderzoek

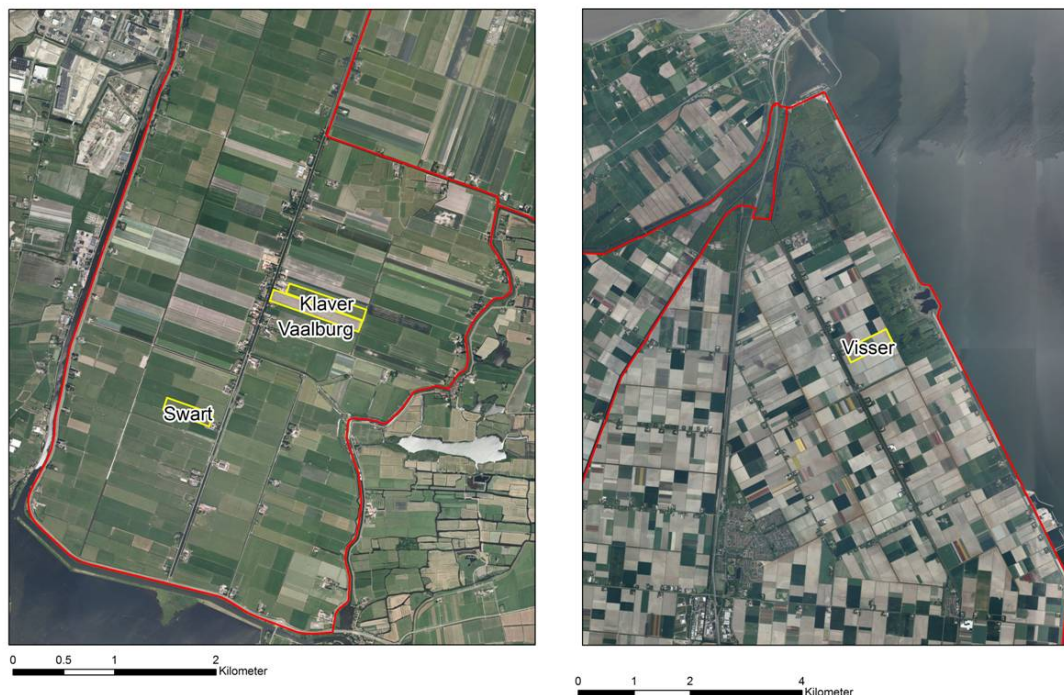
3.4.1 Keuze van de meetpercelen

De keuze voor de veldwerkpercelen in de detailgebieden is gedaan op basis van reeds bekende gegevens uit literatuur en verkennende veldmetingen. Uitgangspunten daarbij zijn dat de percelen in een polder liggen met zout kwel en het percelen betreft met onderscheidende ontwateringsmiddelen. Op basis hiervan zijn twee begreppelde en twee gedraineerde percelen geselecteerd.

Belangrijk criterium was toestemming van de eigenaar van het perceel om gedurende ongeveer een jaar metingen uit te voeren. De metingen zijn begonnen in de zomer van 2009. De laatste meetapparatuur is in oktober 2010 uit het veld gehaald.

Tabel 3.2 Veldwerkpercelen

| Eigenaar | Locatie | Ontwatering |
|---------------|--------------------|-------------|
| Dhr. Swart | Schermer-Zuid | Greppels |
| Dhr. Klaver | Schermer-Zuid | Greppels |
| Dhr. Vaalburg | Schermer-Zuid | Drains |
| Dhr. Visser | Wieringermeer-Oost | Drains |



Figuur 3.14 Veldwerkpercelen in de Schermer (links) en de Wieringermeer (rechts).

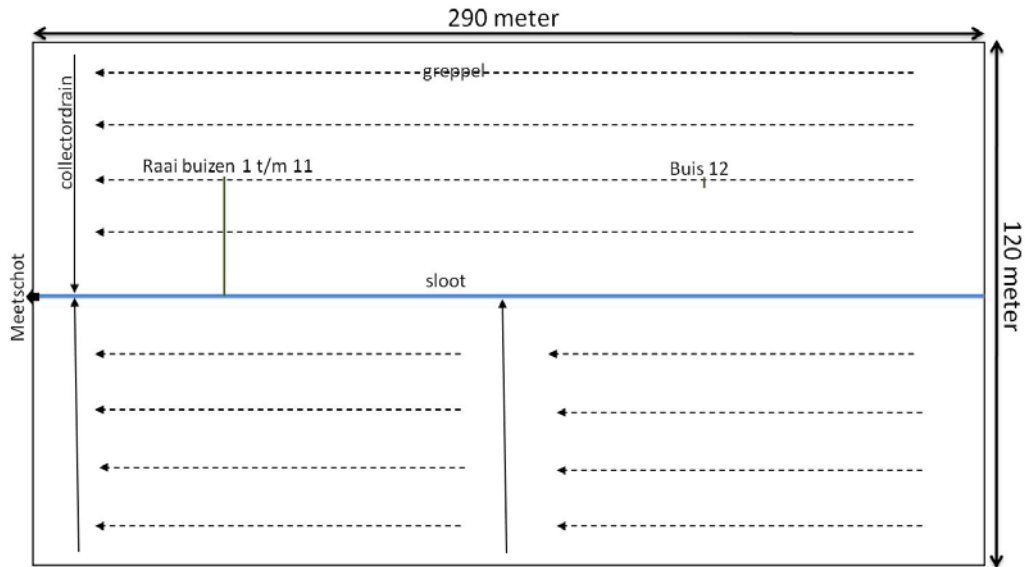
Er zijn vier veldwerkpercelen gekozen (Tabel 3.2 en Figuur 3.14). Twee begreppelde percelen zijn gelegen in de Schermer: het perceel van dhr. Swart en het perceel van dhr. Klaver. Van de gedraineerde percelen is het perceel van dhr. Vaalburg in de Schermer gelegen en het perceel van dhr. Visser in de Wieringermeer.

Uitgebreide veldmetingen zijn uitgevoerd om de zoutgehalten in het grondwater en daarmee de regenwaterlens in beeld te brengen. Ieder perceel is daartoe ingericht met permanente meetinstellingen, zijn periodieke metingen uitgevoerd en zijn eenmalige metingen verricht. De methodologie van metingen is reeds beschreven in paragraaf 3.3. In de onderstaande paragrafen volgen de resultaten van ieder perceel.

3.4.2 Begreppeld perceel - Perceel Swart

Beschrijving perceel

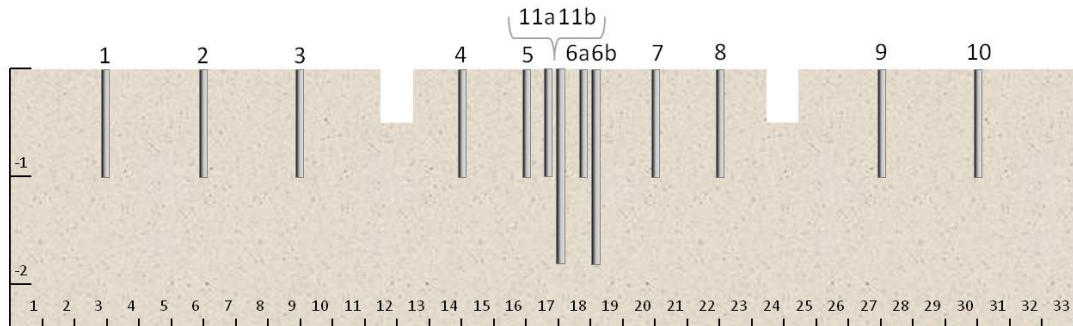
Het perceel van dhr. Swart is gelegen in de Zuid-Schermer. Het betreft twee begreppelde percelen gescheiden door een sloot waarop beide percelen afwateren. De percelen zijn in gebruik als grasland (Figuur 3.15). De waterafvoer van het 290 m lange perceel wordt geregeld via greppels waaruit het water naar een collectordrain aan het eind van het perceel wordt afgevoerd. Deze voert vervolgens het water af naar de sloot. De greppels liggen ca 12 m uit elkaar. De greppelbasis ligt ca 0.30 - 0.40 m onder maaiveld. De greppels voeren alleen water tijdens natte perioden. In totaal voert de sloot het water van een gebied met een oppervlak van 35000 m² af.



Figuur 3.15 Schematische weergave van het meetperceel Swart.

Meetopstelling en uitgevoerde metingen

Over een raai van ongeveer 30 meter beginnend bij de sloot zijn peilbuizen geplaatst op een diepte van 1 m met een filterlengte van 1m (Figuur 3.16). Doel van deze peilbuizen is het meten van de grondwaterstand gedurende de meetperiode. De grondwaterstand kan mogelijk uitzakken tot de onder het niveau van deze peilbuizen. Om dit te ondervangen zijn daarom ook enkele peilbuizen met een lengte van 2m geplaatst met een filterlengte van 20cm, gecodeerd met een b. In de buizen 4, 5, 6a, 6b, 7, 8, 12b zijn TD-divers gehangen, de buizen 1, 2, 3, 9, 10, 11a, 11b en 12a werden wekelijks met de handmatig bemeten.



Figuur 3.16 Peilbuizen perceel Swart, met links de sloot. Greppels op 12, 24 en 36 meter (laatste niet zichtbaar) vanaf de sloot (links, niet zichtbaar). Afstanden en dieptes in meters.

De totale afvoer van het perceel is continue gemeten. Hiervoor in de sloot aan het einde van het perceel een meetschot geplaatst (zie 3.3.10). Aan het andere uiteinde van het perceel is de sloot afgedamd. De afvoer is daardoor volledig afkomstig van het perceel. Bij het ontwerp van het meetschot is rekening gehouden met de te verwachten afvoeren. Uitgegaan is van een neerslaghoeveelheid van 15mm/d dat in één keer tot afvoer komt en van een lage afvoer van 0.3mm/d (minimale kwelflux). In het eerste geval moet de opening de betreffende hoeveelheid kunnen verwerken en niet te veel opstuwten. In het tweede geval moet er voldoende stuwning zijn dat er water blijft lopen. Op basis hiervan is besloten tot een V opening met een hoek van 30°. Achter het meetschot is een CTD-diver geplaatst in combinatie met een barometer waarmee de waterhoogte is gemeten. Behalve de totale afvoerhoeveelheid wordt met de CTD diver ook de kwaliteit van het water gemeten. Ten slotte is er een CTD diver geplaatst in de collectordrain. Deze heeft als

doel het verloop van de waterkwaliteit bij afvoer uit de greppels te volgen. Ook zou het hiermee mogelijk moeten zijn de relatieve bijdrage van zout uit de greppels en de directe kwel in de sloot van elkaar te scheiden.

Om ook een goed beeld te krijgen van de kleinschalige variaties in de neerslag op het perceel is een regenmeter in de Schermer geplaatst. Deze staat op het erf van dhr. Swart.

Naast deze permanente meetopstelling zijn periodieke metingen uitgevoerd. Het betreft CVES metingen te plaatse van de raai peilbuizen en enkele eenmalige metingen over de sloot en ter plaatse van buis 12. Eenmalig is een meetcampagne uitgevoerd waarbij langs de raai met peilbuizen een CVES meting is gecombineerd met prikstokmetingen en het nemen van bodemonsters op verschillende dieptes. Van de bodemonsters zijn watermonsters genomen en geanalyseerd. Doel van deze meetcampagne is onder andere verificatie van de CVES metingen en het vaststellen van formatiefactoren.

Tenslotte zijn eenmalig Hooghoudt proeven uitgevoerd om een indicatie van de doorlatendheid van de bodem te verkrijgen.



Figuur 3.17 Perceel Swart, overzicht metingen.

Bodemopbouw

Tijdens het oriënterende veldbezoek op 21 april 2009 is de bodemopbouw van dit perceel beschreven. De locaties van de beschreven bodemprofielen is weergegeven in Figuur 3.18.

In dit perceel kan de bodemopbouw op korte afstand van elkaar verschillen. In de greppel en er vlak naast bestaat de bovengrond vaak uit moerig of venig materiaal, het is meest verspoeld veen met slakjes er doorheen en ongeveer 35 cm dik. Meer op de akker komt nauwelijks veen voor, hier bestaat de bovengrond uit humusrijke, lichte tot zware kleigrond. De humusrijke laag is 15 tot 20 cm dik. De kleiige ondergrond wordt met de diepte toe lichter, beneden 1 m –mv is de diepere ondergrond zavelig. De humusrijke bovengrond is kruimelig en bestaat uit kleine bolvormige elementjes (granulair). De grond is na 35 mm vochtig en vrij zacht. Het gras wortelt tot ongeveer 70 cm –mv in een

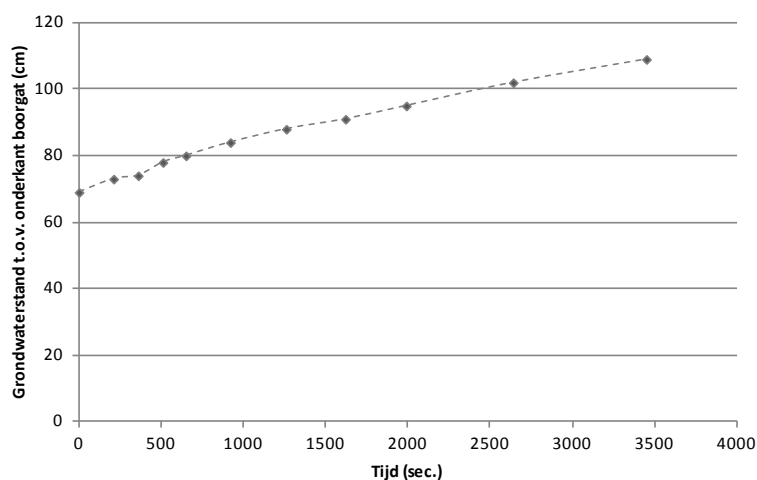
zeer poreuze grond. Ook de diepere en slappe (vrijwel ongerijpte) ondergrond is zeer poreus. Net onder de humusrijke bovengrond komt veel oranje roest voor. In de half gerijpte kleigrond op een diepte van 40 tot 70 cm zit minder roest en hier komen gele kattekleivlekken voor. Dit zijn geoxideerde sulfiden (pyriet FeS_2) en de gele kleur ontstaat door jarosiet (=ijzersulfaat). Kattekleivorming is een proces dat zich tijdens de rijping afspeelt en kan ontstaan in een brak milieu waar zich een rietvegetatie kon ontwikkelen (Bakker en Locher, 1987). Dit betekent eveneens dat de kleigrond extreem zuur is. Onder de katteklei (op ongeveer 70 cm -mv) is de blauwe zavelige grond gereduceerd, slap en kalkrijk, in en vlakbij de greppels zit deze blauwe grond al op een diepte vanaf 35 cm. De kleigrond is zeer goed waterdoorlatend en ook de zavelige ondergrond is goed doorlatend. Het grondwater op de akkers fluctueert tussen 15 en 70 cm beneden maaiveld, dit is te karakteriseren met grondwatertrap II (Gt II), waarbij moet worden opgemerkt dat de oostkant van het perceel iets droger is door een hogere ligging.



Figuur 3.18. Perceel Swart met locaties van profielbeoordelingen.

Doorlatendheid van de bodem

Om de doorlatendheid (k-waarde) van de bodem te bepalen is een Hooghoudtproef uitgevoerd. Onderstaande grafiek toont het verloop van de grondwaterstand in de tijd. Op basis hiervan is een doorlatendheid vastgesteld van 0.014 m/d. Er zijn tevens twee



Figuur 3.19. Resultaat Hooghoudtproef perceel Swart

proeven gedaan in peilbuizen. Eén in peilbuis 12b waar een lagere waarde is gevonden van 0.003 m/d. Tenslotte is een meting uitgevoerd in een peilbuis met het filter in de zandige laag onder de deklaag op ca. 3m-mv. Hier is een waarde vastgesteld van 1.05 m/d.

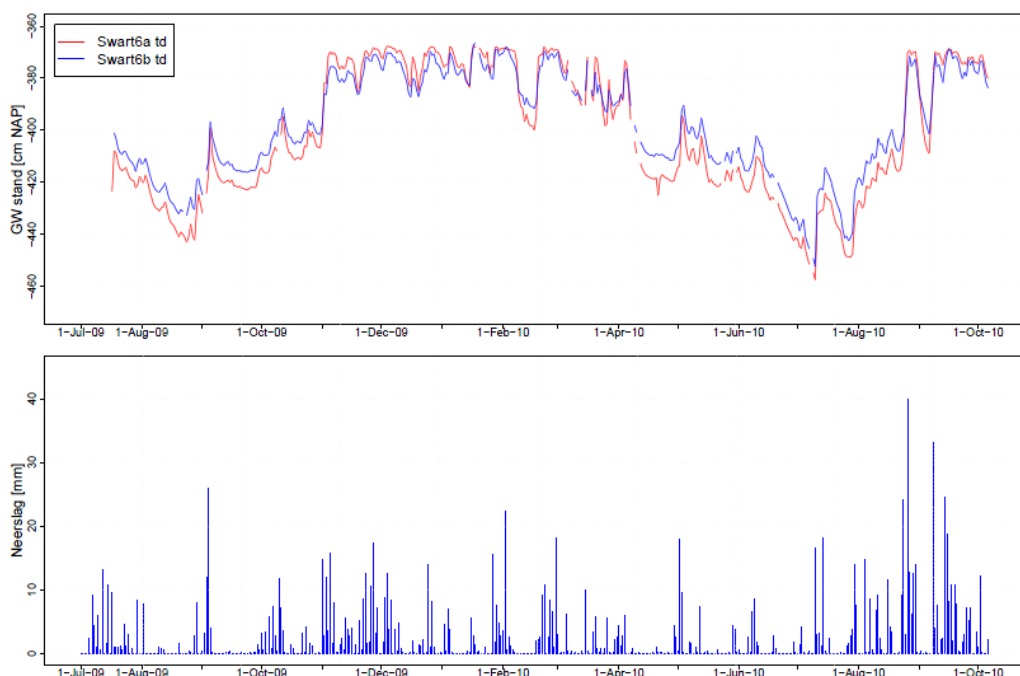
Verloop grondwaterstand

De grondwaterstand is maximaal tot aan maaiveld in natte perioden en zakt in droge perioden tot ongeveer een meter onder het maaiveld. In bijlage 1a-1c zijn de gemeten grondwaterstanden in grafieken opgenomen. Hieronder enkele resultaten met elkaar vergeleken en in context geplaatst.

Grondwaterstand verschil diep – ondiep filter geeft informatie over verticale richting stroming

Het verschil in tussen de gemeten grondwaterstanden tussen buis 6a en 6b geeft aan of er sprake is van neergaande flux of opwaartse flux (Figuur 3.20 en bijlage 1b). Gedurende een natte periode (winter) ligt in buis 6 de stijghoogte in het diepe filter wat lager dan de stijghoogte van het ondiepe filter. Er hier sprake van een neerwaartse flux. In de periode tot half december loopt dit verschil op tot maximaal 13cm. In de periode erna is het verschil tussen het diepe het ondiepe filter gering. Dit duurt voort tot april. Deze periode correspondeert met de periode waarin vanaf 17 december tot begin februari vrijwel onafgebroken een sneeuwdek op het perceel heeft gelegen. Tot in april was er sprake van nachtvorst. Hierdoor kon in deze periode waarschijnlijk in geringe mate grondwateraanvulling plaatsvinden. Eventuele neerslag wordt dan oppervlakkig afgevoerd naar de greppels en sloot.

Een vergelijkbaar beeld zien we ook in het hoger gelegen peilbuis 12 op hetzelfde perceel, waarbij opgemerkt dat het wekelijkse handmetingen zijn. Ook hier ligt de gemeten waarde van het diepe filter tot half december boven dat van het ondiepe filter. In de vorst/sneeuwperiode lopen ze gelijk en vanaf februari zakt de grondwaterstand weg.

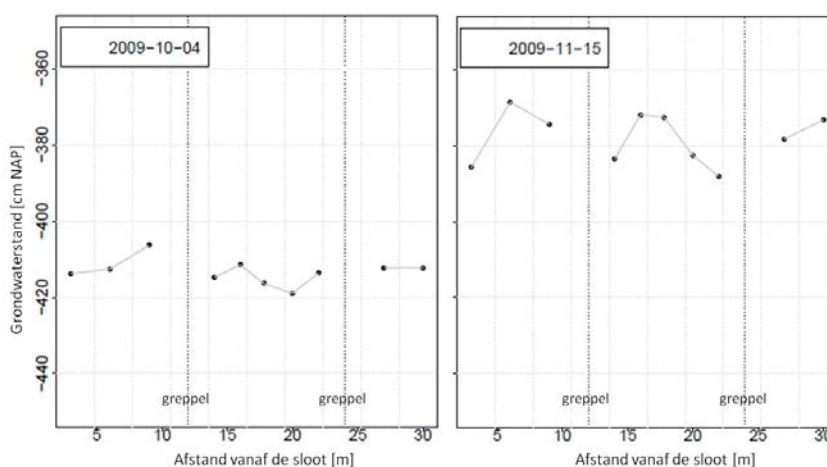


Figuur 3.20 Gemeten verloop van de grondwaterstand in diepe en ondiepe filter voor peilbuis 6. Het maaiveld ligt op ongeveer -345cm NAP. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter.

In peilbuis 11 (gelegen naast peilbuis 6) is vrijwel geen verschil te zien tussen het diepe en ondiepe filter. Vermoedelijk is hier sprake van een kortsluiting binnen het boorgat waarin de filters zijn geplaatst.

Verloop grondwaterstand tussen de greppels

Grafieken van de grondwaterstand van de buizen op het perceel laten zien voor twee momenten in het meetjaar langs de meetraai. Grafieken voor een doorlopende reeks gedurende het jaar zijn opgenomen in (bijlage 1c en bijlage 1d (detail)). De grafieken tonen de invloed van de greppels op de grondwaterstand. Dit inzicht is te combineren met de metingen van Figuur 3.20. Tijdens de natte periode van de winter is sprake van opbolling. Het patroon is echter niet symmetrisch. In droge perioden is er geen relatie van de grondwaterstand tot de greppels. De reden hiervoor is dat de grondwaterstand onder het niveau van de greppels daalt. De grafieken tonen verder aan dat de invloed van de sloot op de grondwaterstand na de eerste greppel afwezig is en dat het systeem tussen de greppels autonoom reageert, ook wanneer de grondwaterstand beneden het niveau van de greppels daalt.



Figuur 3.21 Verloop grondwaterstand op perceel Swart, links 4 oktober 2009, rechts 15 november 2009. De sloot bevindt zich op 0 meter, greppels op 12 en 24 meter en zijn ca. 30-40cm diep.

Afvoermetingen in de sloot en verzameldrain

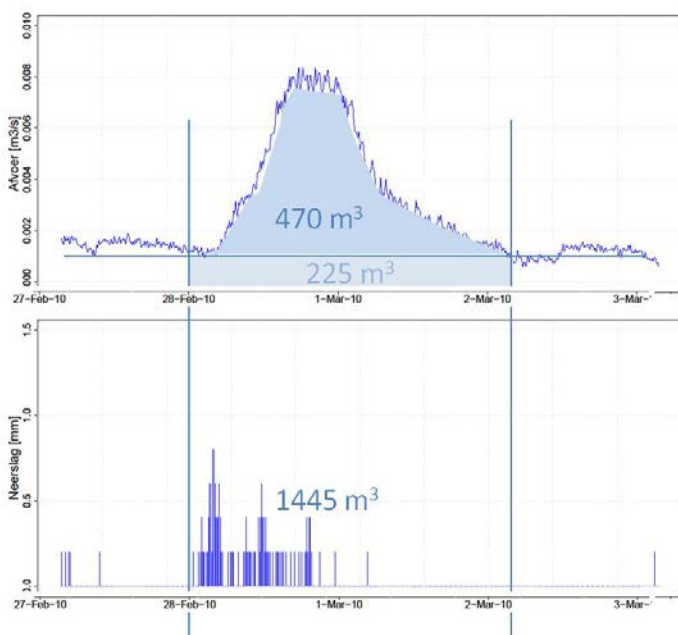
Afvoer via de perceelsloot vindt bijna het hele jaar door plaats, alleen in de zomer van 2010 is er een periode zonder afvoer (bijlage 2). De hoogste piekafvoer ligt rond de 0.05 m³/s op 17 januari. Over de periode van 16 tot en met 20 januari registreert de regenmeter in totaal 10 mm neerslag, dit komt overeen met 351 m³. Van 16 januari tot en met 20 januari wordt een piekafvoer berekend van in totaal ongeveer 9500 m³. De hoeveelheid afvoer komt overeen met 271 mm. Dit is geen realistische waarde. De reden voor de foutieve meting ligt in de sneeuw en ijs in de sloot. Tijdens een veldbezoek op 19 januari is waargenomen dat er nog steeds sneeuw en ijs lag, sneeuw lag door het windeffect opgehoopt op het ijs in de sloten. En ook de meetapparatuur was ingevroren in het ijs.

Tabel 3.3 Grondwaterstand buis 6a en 6b perceel Swart voor 28 feb tot 2 mrt 2010.

| Datum & tijd | 6a | 6b |
|----------------|--------|--------|
| 28/2/2010 7:00 | -370.6 | -373.3 |
| 1/3/2010 6:00 | -367.9 | -367.3 |
| 2/3/2010 6:00 | -370.4 | -373.1 |

Een andere neerslagafvoer gebeurtenis vond plaats op 28 februari 2010. Het betreft een gebeurtenis die plaats vond over de periode van 1 dag, 28 februari 2010 6:00 tot 1 maart 2010 6:00. De totale neerslaghoeveelheid bedroeg in totaal 21.2 mm (742 m³) en resulteert in een afvoer van 470 m³ (Figuur 3.22). De vermelde 225 m³ is de basisafvoer.

Normaal zou dit verschil verklaard kunnen worden door de berging in de bodem. Echter, over deze periode stijgt weliswaar de grondwaterstand maar daalt ook weer naar het oude niveau binnen de periode van afvoer. Dit betekent dat er geen berging heeft gevonden (Tabel 3.3). De oorzaak van de lagere gemeten afvoer is waarschijnlijk dat er water langs het schot stroomde, dit is begin februari ook een keer waargenomen in het veld.



Figuur 3.22 Afvoer 27 feb. – 3 mrt 2010 van de sloot bij perceel Swart als gevolg van neerslag.

De metingen van afvoer en EC in de zomerperiode van juli 2009 – oktober 2009 en de periode juli 2010 – oktober 2010 zijn beter verlopen. Illustratief is de meetserie van 2010 (Figuur 3.23). In de zomermaanden vindt geen neerslag plaats over het meetschot. Er is sprake van een verdampingoverschot. Dat wil hier zeggen de kwel en de neerslag samen zijn kleiner dan de verdamping. Dit uit zich in een toenemende geleidbaarheid van het water (en chlorideconcentratie) in de sloot.

Rond 9 augustus is de neerslag voldoende dat de grondwaterstand stijgt en de greppels water gaan afvoeren (Figuur 3.23b). Dit uit zich in een geleidelijke stijging van het waterpeil in de sloot. Dit lijkt overeen te komen met een snelle toename van EC in de collectordrain. Het is echter onzeker of dit een meetartefact is of een werkelijke toename. In de periode die volgt vult de sloot zich verder met afvoerwater uit de percelen tot het overlooppniveau. Een lichte daling van de EC in de sloot het gevolg.

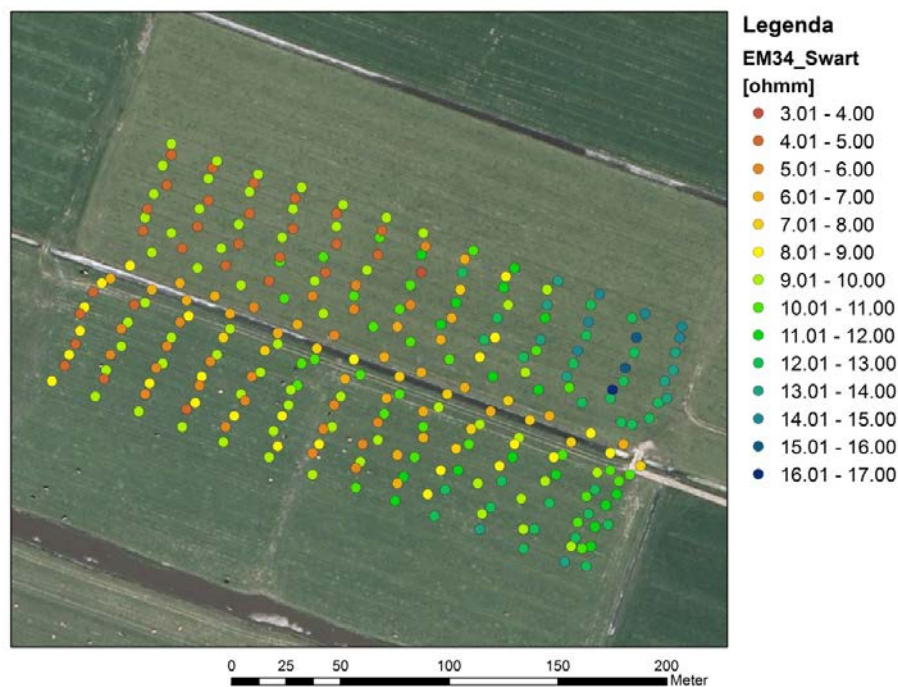
Op 26 augustus valt veel neerslag die de natte periode inluidt. Als gevolg van de neerslag komt de sloot tot afvoer. De neerslaggebeurtenis is als klein dipje van de geleidbaarheid zichtbaar in zowel de EC-meter van de sloot als in de collectordrain. In de periode erna valt er meer neerslag en blijven de greppels water afvoeren. Het waterpeil in de sloot stijgt en er wordt een afvoer gemeten. De afvoer van de greppels reageert snel op neerslaggebeurtenissen. Bij een bui voert de sloot water af en is een verlaging in EC in de greppels te zien. Door de voortdurende aanvoer van neerslagwater neemt de geleidbaarheid in de sloot langzaam af.



Figuur 3.23. Van boven naar beneden: EC drain en sloot [mS/cm] (a); Afvoer in de sloot [m³/s] (b); Waterstand in de sloot (greppel is relatieve waarde) [cm NAP] (c); Grondwaterstand [cm NAP] (d) en Neerslag [mm] (e) op perceel Swart juli-oktober 2010.

Ruimtelijke geleidbaarheidsmetingen met de EM34 methode

Op het perceel is eenmalig in mei 2009 met de EM34 methode een reeks profielen gelopen waarbij om de 20 meter een meting is uitgevoerd. De EM34 geeft informatie over ruimtelijke variatie van zoutgehalte en/of lithologie van het perceel. De metingen geven de gemiddelde geleidbaarheid over een diepte van ca. 10m. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.24 waarbij gemeten geleidbaarheid is geconverteerd naar een waarde van de weerstand.

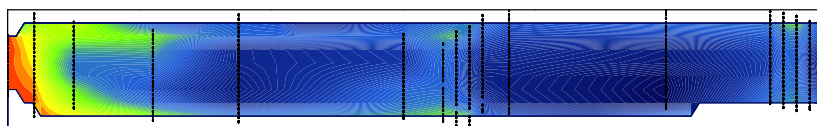


Figuur 3.24. Gemeten weerstanden gemeten met de EM34 in mei 2009.

Er zijn twee duidelijke patronen te herkennen. In de eerste plaats is de weerstand bij de greppels beduidend lager dan de waarden in het midden tussen de greppels. De waarde is ongeveer twee keer zo hoog midden tussen de greppels. In de tweede plaats neemt de weerstand toe van het westen naar het oosten. Beide patronen lijken verband te hebben met het zoutgehalte en niet met lithologie. De hogere weerstand tussen greppels duidt op de aanwezigheid van een neerslaglens tussen de greppels. Het tweede patroon is gerelateerd aan het oplopende maaiveld van west naar oost.

Geleidbaarheidsmetingen met de prikstok

Naar aanleiding van het patroon dat uit de EM34 resultaten naar voren komt zijn aanvullende metingen met de prikstok en CVES uitgevoerd. Met de prikstok zijn twee raaien gemeten. De eerste raai ligt in het westelijke deel waar de weerstand volgens de EM34 relatief laag is. De tweede raai ligt in het oostelijke deel waar de weerstand relatief hoog is.



Figuur 3.25 Prikstokmetingen perceel Swart raai 1 (boven) en raai 2 (onder), mei 2009. Tevens is indicatief de weerstand omgerekend naar chloride.

Raai 1 loopt vanaf de sloot tot aan de tweede greppel en bevat 19 meetreeksen tot maximale diepte van 2.70 meter. Figuur 3.25 laat lage weerstand zien bij de sloot en de greppels van 1 tot 3 Ohmm. Tussen de sloot en de greppels liggen de waarden hoger en vormen een lens met een weerstand van 10 tot 24 Ohmm. Raai 2 loopt vanaf de sloot tot een halve meter naast de tweede greppel en bevat 17 meetreeksen tot maximaal 3.25 m diepte. Bij Raai 2 is heeft weerstandswaarden die over het algemeen hoger liggen dan 15 Ohmm. Bij de greppels zijn geen weerstanden lager dan 5 Ohmm gemeten. Alleen bij de sloot worden lagere waarden gemeten.

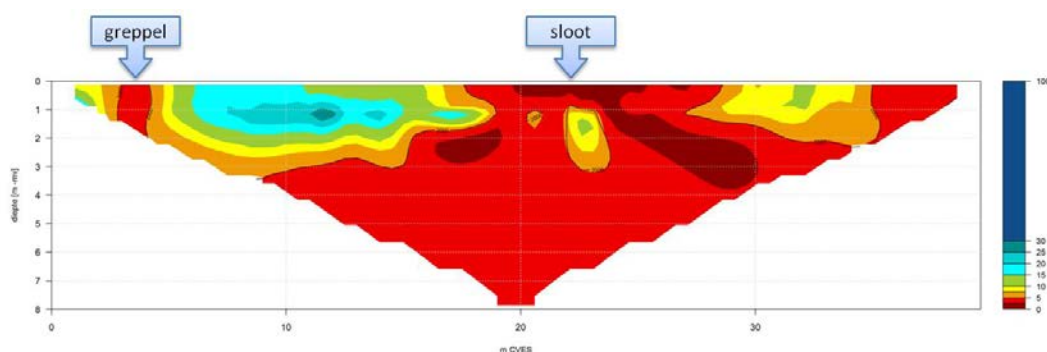
Op twee plaatsen is bij een prikstokmetingen ook een boorgat gemaakt. Van het grondwater uit het boorgat is een watermonster genomen en is de geleidbaarheid bepaald. Gecombineerd met de meting van de prikstok op de betreffende diepte waarvan het watermonster is genomen is een formatiefactor vastgesteld van 2.2 (zie 3.3.1). Hiermee zijn de weerstanden vertaald naar chloridegehalten (zie legenda Figuur 3.25).

De gemeten raaien met de prikstok bevestigen het vermoeden uit de EM34 dat er zich tussen de greppels een neerslaglens bevindt. Gecombineerd met de EM34 meting kan op

basis van de prikstokmeting vastgesteld dat deze neerslaglenzen zich over de gehele lengte van het perceel aanwezig zijn. De dikte van de neerslaglens in het westelijk 2 tot 2,5m dik. In het oostelijk hoger gelegen deel is de neerslaglens duidelijk dikker tot meer dan 3m. De hogere ligging van het maaiveld maakt het blijkbaar mogelijk een dikkere neerslaglens te vormen.

Geleidbaarheidsmetingen met de CVES

De eerste CVES meting is in mei 2008 uitgevoerd ongeveer ter hoogte van de peilbuizen 1-10 dwars op de middensloot waarin het meetschot is gezet (Figuur 3.26). Op de plaats van de sloot (op 22.65 meter vanaf het begin van de CVES) is de weerstand tot aan het oppervlak laag. Dit is ook bij de greppels het geval. Uit de prikstok meting is al gebleken dat er tussen de greppels neerslaglenzen van zoet water aanwezig zijn. Met de CVES methode blijkt deze neerslaglens nog beter in beeld te kunnen worden gebracht. Naast de neerslaglens wordt uit deze CVES meting duidelijk dat er zout-brak water stroomt naar de greppel en een brede zone brakke kwel naar de sloot toestroomt.



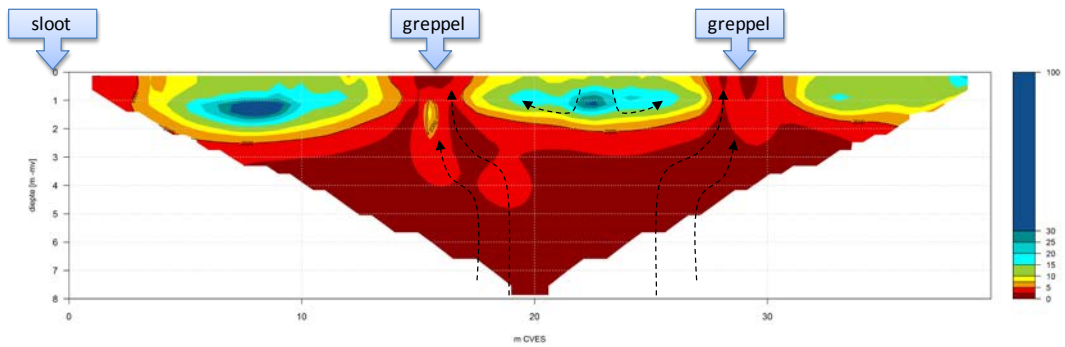
Figuur 3.26 CVES meting perceel Swart, mei 2008. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/l berekend met een formatiefactor van 3.

In de jaren erna zijn CVES metingen herhaald ter hoogte van de raai met de peilbuizen 1-10 vanaf de sloot. Het betreft achtereenvolgens een meting in mei 2009 (Figuur 3.27), oktober 2009 (Figuur 3.28) en april 2010 (Figuur 3.29). De (kleur)schaal van de figuren is gelijk.

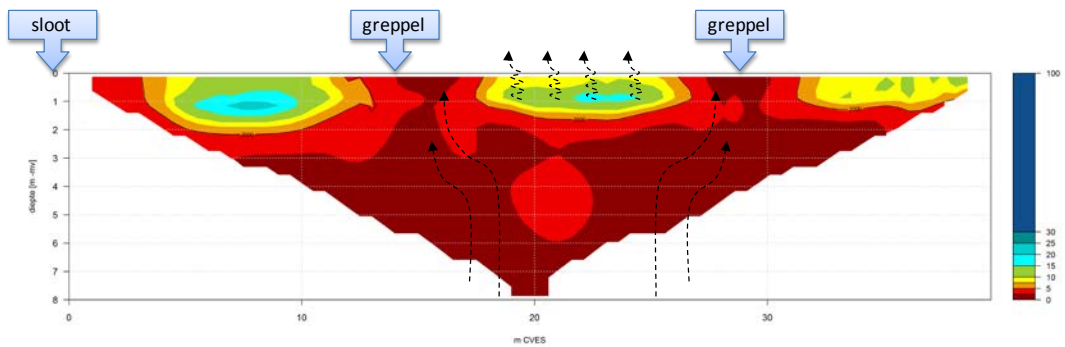
De eerste meting in mei geeft de situatie weer na een natte periode. De neerslaglenzen tussen de sloot en greppels zijn duidelijk zichtbaar. De kleinschalige ontwatering (in dit geval greppels) bepalen hier de omvang en begrenzing van de greppels. De neerslaglenzen lijken los te staan van de greppels, die aan weerszijden brak zijn. Uit de CVES profielen is goed af te leiden dat het brakke water naar de greppels stroomt.

De lenzen hebben, zoals al uit de prikstokmeting bleek, een dikte van circa 2m. Waarbij moet worden opgemerkt dat op basis van de weerstanden niet de beschikbaarheid van zoet water beperkt is. Er lijkt meer sprake van licht brak water. Interessant is te zien dat in de meting na de zomer van 2009 (oktober) de neerslaglenzen naar verwachting zijn gekrompen. Dit komt doordat er in de zomer weinig neerslag valt en het water is onttrokken door een combinatie van verdamping en voeding van het gras.

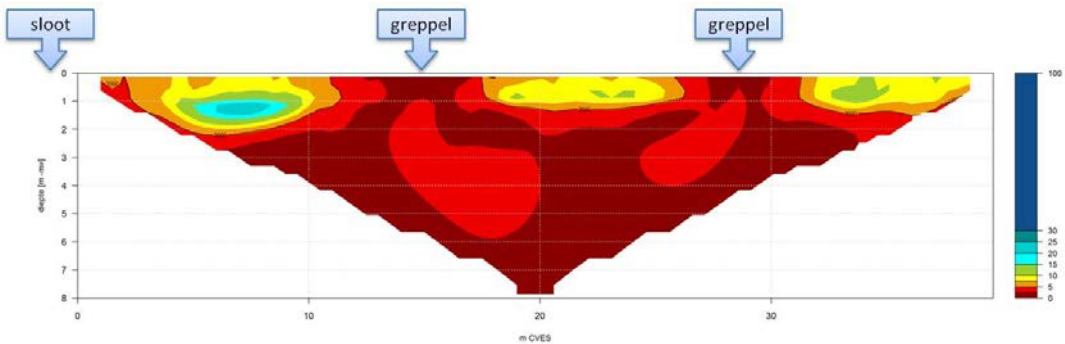
Opmerkelijk is de verdere waargenomen afname van de neerslaglens in het voorjaar van 2010. De verwachting zou zijn dat de neerslaglens na een natte periode weer aangevuld zou zijn. Zoals al eerder geconstateerd bij de beschrijving van de grondwaterstanden heeft er in deze winter gedurende de periode van half december tot februari vrijwel onafgebroken een sneeuwdek op het perceel gelegen. Tot in april was er sprake van nachtvorst. Eventuele neerslag wordt dan oppervlakkig afgevoerd naar de greppels en sloot. Hierdoor kon in deze periode waarschijnlijk in geringe mate grondwateraanvulling plaatsvinden en kon de neerslaglens niet worden aangevuld.



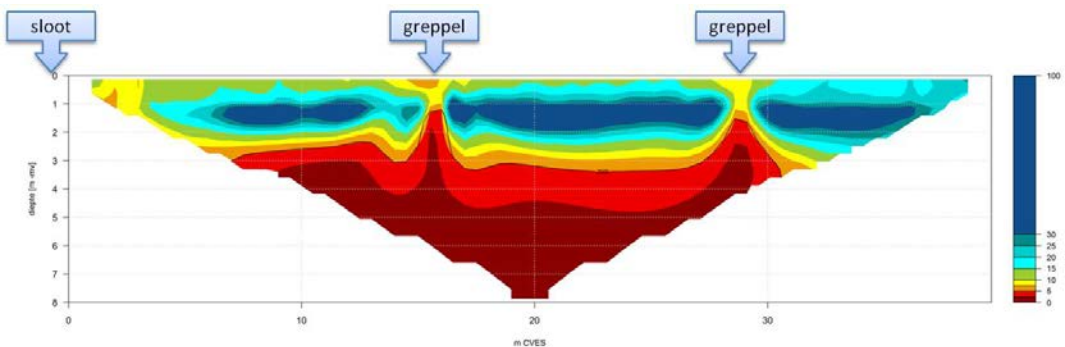
Figuur 3.27 CVES meting perceel Swart, mei 2009. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de natte periode ingetekend.



Figuur 3.28 CVES meting perceel Swart, oktober 2009. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de droge periode ingetekend.



Figuur 3.29 CVES meting perceel Swart, april 2010. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3.

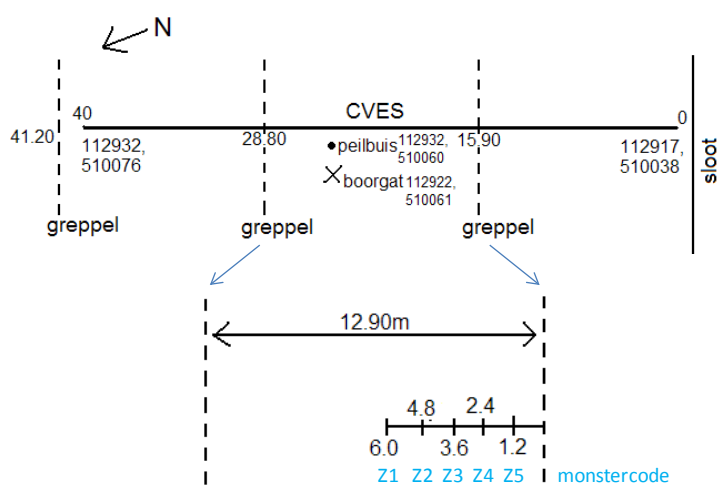


Figuur 3.30 CVES meting oostelijk deel perceel Swart, april 2010. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3.

De eerder uitgevoerde EM34 metingen en prikstokmetingen gaven in het oostelijk deel van het perceel hogere weerstanden er is daarom in april 2010 nog aanvullende CVES meting uitgevoerd (Figuur 3.30). Deze meting kan worden vergeleken met de prikstokmeting op dezelfde plaats van mei 2009 (Figuur 3.25). Ook hier is de kleinschalige ontwatering (greppels) bepalend voor de omvang en begrenzing van de neerslenzen. Nog duidelijker dan in de andere CVES profielen is hier de verticale stroming naar de greppels af te leiden.

Bodemmonsters, CVES en prikstok

In april 2010 zijn op verschillende diepten bodemmonsters genomen op de locatie van de CVES. Op dezelfde dag dat de monsters zijn genomen zijn een CVES meting en prikstokmetingen is uitgevoerd. De monsters zijn genomen tussen de greppels op 15.9 meter en 28.8 meter van de CVES. Monsters zijn genomen op 6 meter (Z1), 4.8 meter (Z2), 3.6 meter (Z3), 2.4 meter (Z4) en 1.2 meter (Z5) vanaf de greppel op 15.9 meter van de CVES meting. Op dezelfde plaatsen zijn prikstokmetingen uitgevoerd.



Figuur 3.31. Situatieschets van CVES en locaties van bodemmonsters, april 2010.

De watermonsters hebben een overweldigende hoeveelheid data opgeleverd. Dit rapport beperkt zich tot de uitwerking van chloride. De overige analyseresultaten van waterchemie en zuurstofisotopen zijn wel opgenomen in bijlage 8.

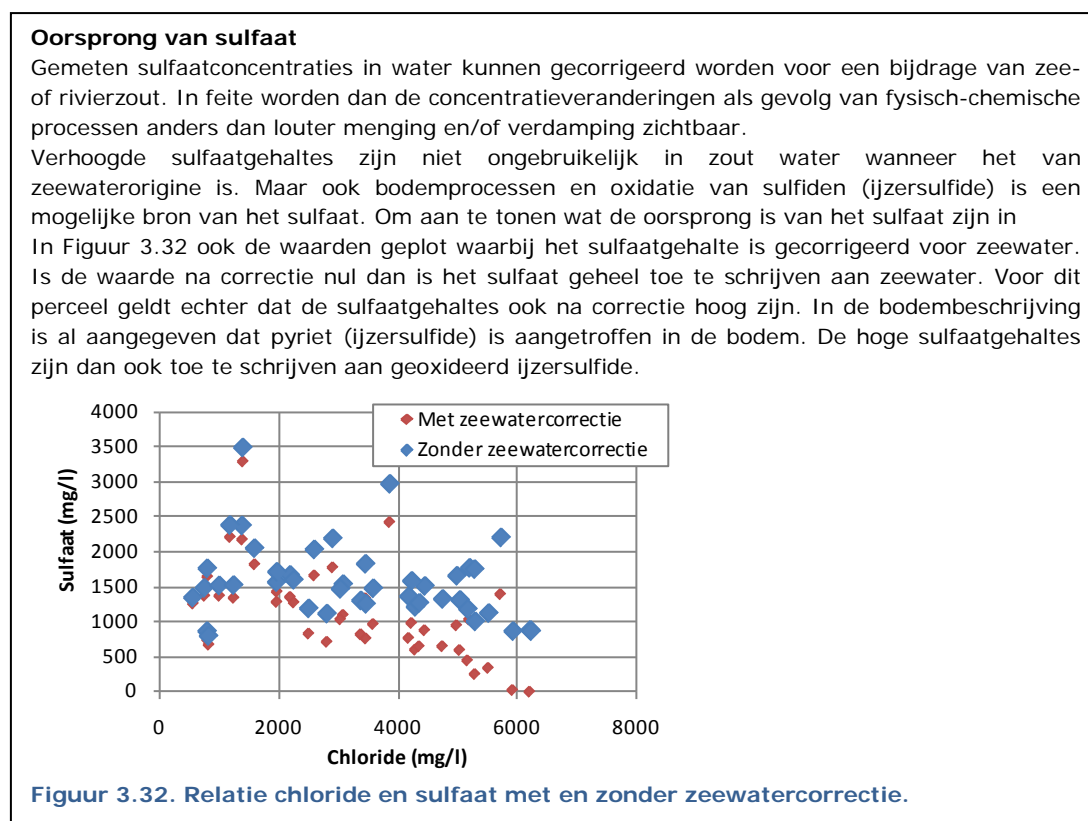
Prikstokmetingen en CVES metingen meten de bulk geleidbaarheid van bodem en poriewater. In paragraaf 3.3 is beschreven hoe met de formatiefactor van geleidbaarheid de chlorideconcentratie kan worden geschat. Door nu gebruik te maken van de watermonsters kan een betere schatting gemaakt worden van de formatiefactor. Waar de prikstok een directe meting is van de geleidbaarheid op een gegeven diepte is dat niet het geval bij een CVES meting. De CVES doet een reeks metingen waarna met software een tweedimensionaal beeld wordt geïnterpreteerd. De interpretatie is op verschillende manieren te sturen. Het tweede doel van de watermonsters, naast het bepalen van de formatieweerstand, is dan ook de resultaten van de metingen van de prikstok en CVES te toetsen.

In paragraaf 3.3 is uiteengezet hoe uit een gemeten bulk weerstand en/of bulk geleidbaarheid van water en bodem de chlorideconcentratie van het water te bepalen is. De eerste stap is om alle gemeten waarden van watermonsters, prikstok en CVES te corrigeren voor temperatuureffecten en te vertalen naar een standaardtemperatuur van 20°C. De volgende stap is om uit de bulk geleidbaarheid van prikstok en CVES de

geleidbaarheid van het water te berekenen. Deze stap vindt plaats met behulp van de vereenvoudigde relatie van Stuyfzand (1987):

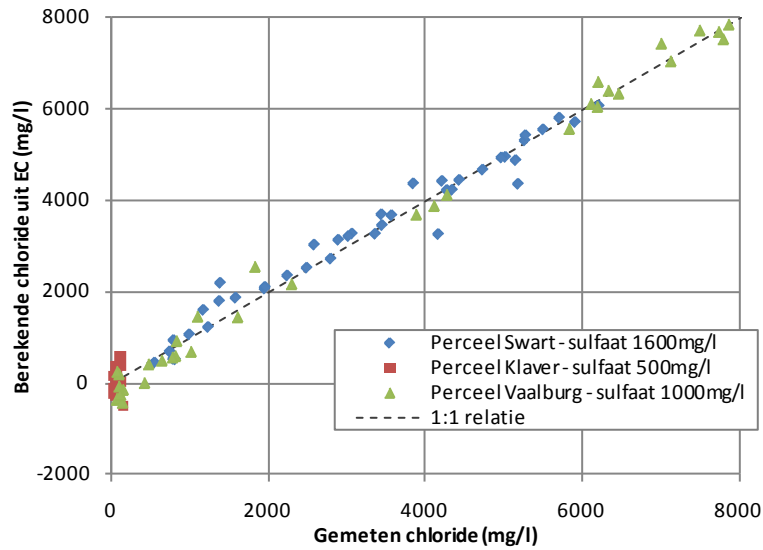
$$(3.8) \quad Cl^- = \left\{ \frac{\sigma_{w20}}{71.027} - \frac{SO_4^{2-}}{48.03} - 8.7834 \right\} / 0.038983$$

Waar σ_{w20} de watergeleidbaarheid en SO_4^{2-} het sulfaatgehalte is. Om de chlorideconcentratie te kunnen berekenen is het sulfaatgehalte dus nodig. Om de berekening eenduidig toe te kunnen passen ook voor andere delen van het perceel is gekozen met één waarde te werken. Figuur 3.32 geeft de relatie van sulfaat tegen chloride weer. Een gemiddelde waarde van het sulfaatgehalte is circa 1600 mg/l en geeft een goed resultaat voor de omrekening volgens formule 3.8 (Figuur 3.33).

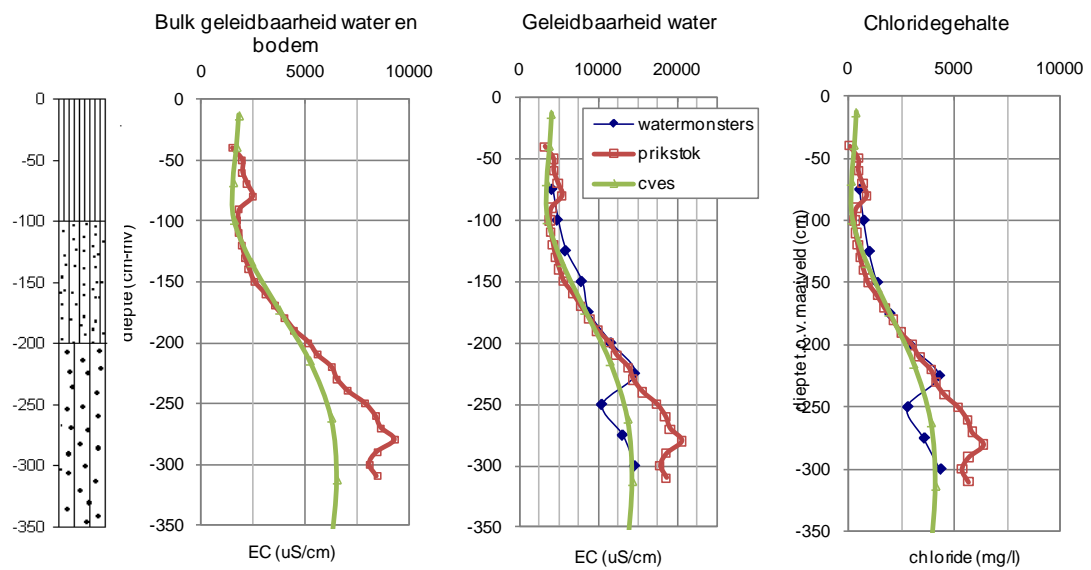


Vervolgens zijn voor de 5 monsterlocaties zijn diepteprofielen gemaakt op basis van de metingen van de prikstok, CVES (geconverteerd naar geleidbaarheid) en watermonsters. De bulkgeleidbaarheid is met een formatiefactor vertaald naar een geleidbaarheid voor water. Deze waarden zijn vergeleken met de gemeten geleidbaarheid van het water uit de watermonsters. Hieruit is een formatiefactor van 2.2 voor het hele diepteprofiel bepaald. Voor locatie Z2 (zie Figuur 3.31) zijn deze weergegeven in Figuur 3.34. De figuur toont ook de resultaten voor de vertaling van geleidbaarheid naar het chloridegehalte.

Geconcludeerd kan worden dat de berekende waarden op basis van de prikstokmetingen goed overeenkomen. Ook de uit de CVES afgeleide waarden komen goed overeen. Echter beneden de 2.5m diepte geeft de CVES lagere waarden dan op basis van de watermonsters mag worden verwacht. De resultaten geven echter voldoende vertrouwen dat de variaties in meetwaarden in een gemeten 2D profiel van de CVES ook werkelijke variaties in de weerstand / geleidbaarheid representeren.



Figuur 3.33. Relatie gemeten chloride uit watermonsters en berekend chloride op basis van gemeten EC uit watermonsters en een vaste waarde voor sulfaat voor de drie percelen in de Schermer.

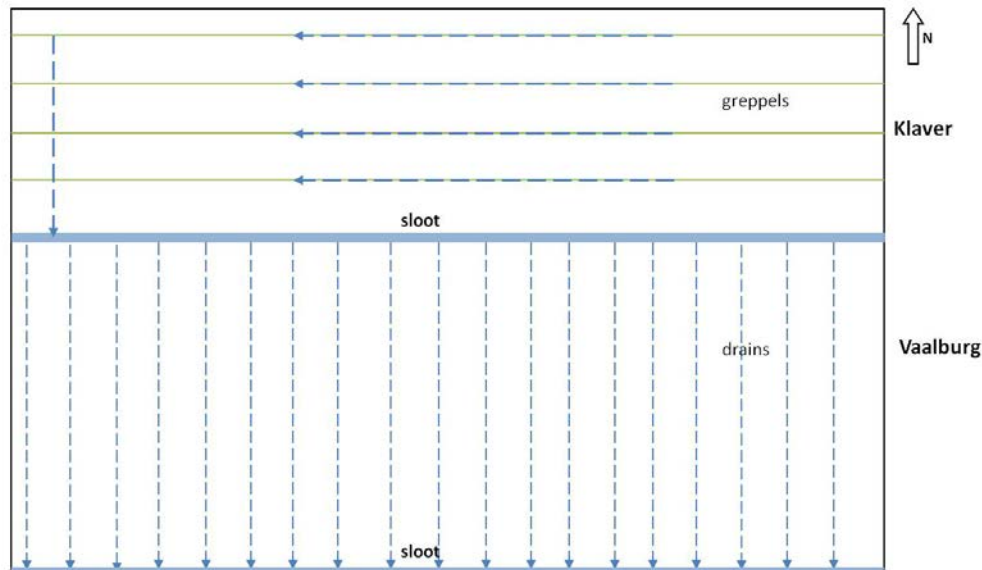


Figuur 3.34. Diepteprofielen van bodemopbouw (a); bulkgeleidbaarheid van bodem en water (b); geleidbaarheid watermonster gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (c); chloridegehalte gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (d).

3.4.3 Begreppeld perceel - Perceel Klaver

Beschrijving perceel

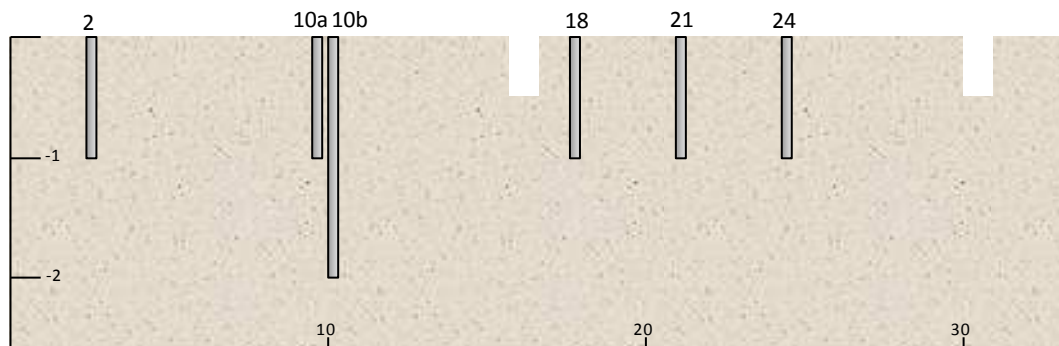
Het perceel van dhr. Klaver is gelegen in de Zuid-Schermer. Het betreft de helft van een begreppeld perceel begrensd door een sloot waarop het perceel afwatert. Het perceel is in gebruik als grasland (Figuur 3.35 en Figuur 3.37). De waterafvoer van het 790 m lange perceel wordt geregeld via greppels. Het perceel is in aantal stukken verdeeld, in elk deel wateren de greppels af naar een collectordrain die het water afvoert naar de sloot. De greppels liggen ca 13 m uit elkaar. De greppelbasis ligt ca 0.30 - 0.40 m onder maaiveld. De greppels voeren alleen water tijdens natte perioden.



Figuur 3.35 Afvoersysteem perceel Klaver en Vaalburg

Meetopstelling en uitgevoerde metingen

Over een raai van ongeveer 25 meter beginnend bij de sloot zijn peilbuizen geplaatst een diepte van 1 m met een filterlengte van 1m (Figuur 3.36). Doel van deze peilbuizen is het meten van de grondwaterstand gedurende de meetperiode. De grondwaterstand kan mogelijk uitzakken tot de onder het niveau van deze peilbuizen. Om dit te ondervangen is ook een peilbuis met een lengte van 2m geplaatst met een filterlengte van 20cm, gecodeerd met een b. In de buizen zijn TD-divers gehangen. De buizen zijn genummerd naar afstand vanaf de sloot. Buis 10b is de peilbuis met het diepe filter.



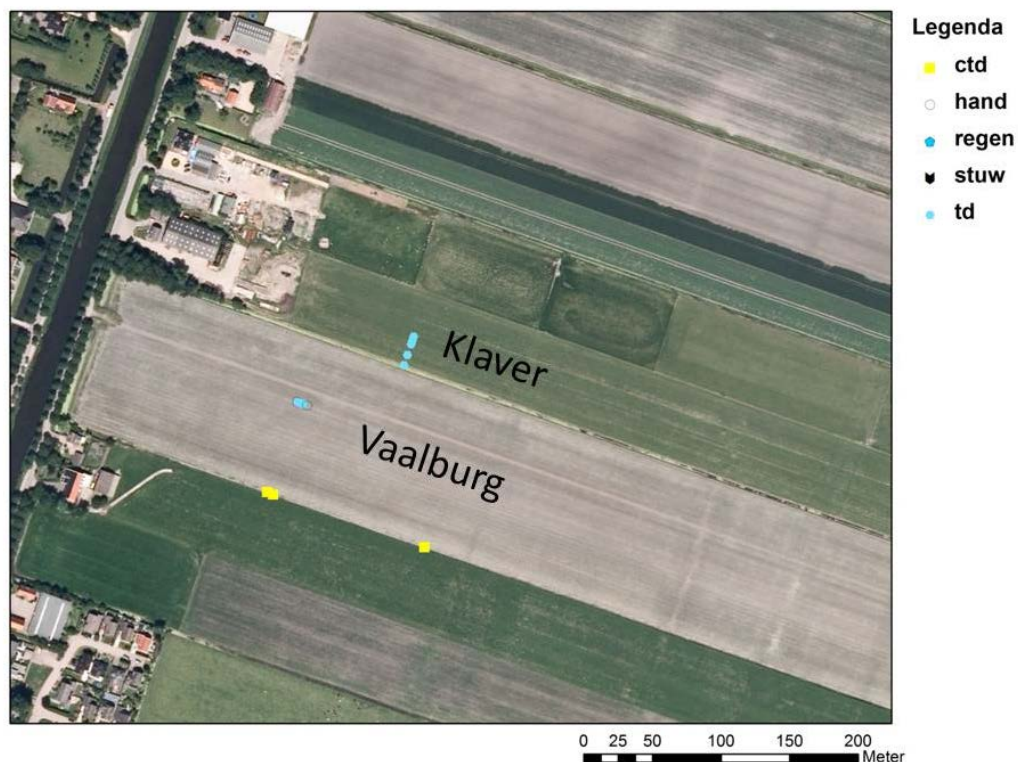
Figuur 3.36 Peilbuizen perceel Klaver, met links de sloot. Greppels op 16.8 en 30.2 meter vanaf de sloot (links, niet zichtbaar). Afstanden en dieptes in meters.

Voor de kleinschalige variaties in de neerslag op het perceel is gebruik gemaakt van de metingen van de regenmeter op 1500m verderop gelegen erf van dhr. Swart.

Naast deze permanente meetopstelling zijn periodieke metingen uitgevoerd. Het betreft CVES metingen ter plaatse van de raai peilbuizen.

Eenmalig is een meetcampagne uitgevoerd waarbij langs de raai met peilbuizen een CVES meting is gecombineerd met prikstokmetingen en het nemen van bodemmonsters op verschillende dieptes. Van de bodemmonsters zijn watermonsters genomen en geanalyseerd. Doel van deze meetcampagne is onder andere verificatie van de CVES metingen en het vaststellen van formatiefactoren.

Tenslotte zijn eenmalig Hooghoudt proeven uitgevoerd om een indicatie van de doorlatendheid van de bodem te verkrijgen.



Figuur 3.37 Perceel Klaver en Vaalburg, overzicht metingen.

Bodemopbouw

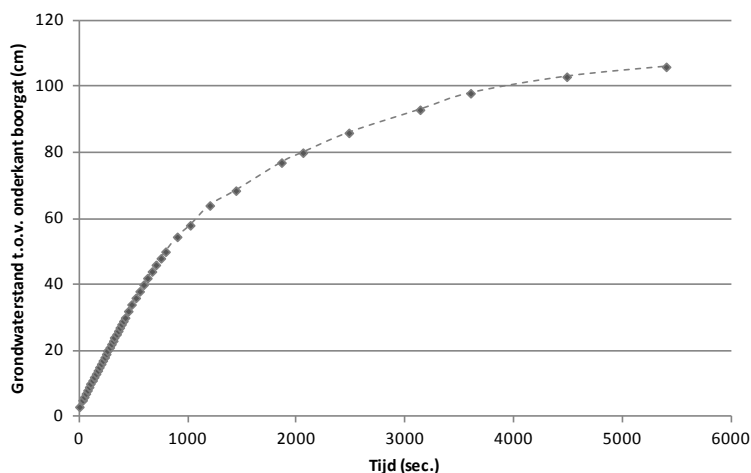
In dit perceel zijn 6 boringen uitgevoerd. De plaatsen van de beoordelingen staan in bijlage 1, 2 en 3 de profielbeschrijvingen in bijlage 4. De profielopbouw in het perceel is redelijk uniform. De zeer humeuze bovengrond van zware zavelgrond is 25 cm dik, hieronder zit een laag van 10 cm zware kleigrond en 20 cm lichte kleigrond. De diepere ondergrond bestaat uit zware zavelgrond. De zwarte bovengrond is rul en kruimelig en iets vochtig. De kleiige ondergrond is grijs, zeer poreus en beworteld tot 55 cm. Deze kleiige laag is al vanaf 30 cm beneden maaiveld (-mv) zeer vochtig met een volume% vocht van 35-40 %, de eronder liggende zavelgrond is nat. In het laagje zware kleigrond komt oranje roest voor, hieronder zit weinig oranje roest. Beneden 90 cm -mv komt fletse roest voor, het oranje roest is hier 'verwaterd'. Het grondwater staat op ongeveer 90 cm -mv. Vanaf 1.10 m is de bodem blauw. Op basis van het bodemprofiel is geschat dat het grondwater fluctueert tussen 70 cm en 1.10 m, te karakteriseren met een grondwatertrap (Gt) VI.



Figuur 3.38. Perceel Klaver en Vaalburg met locaties van profielbeoordelingen.

Doorlatendheid van de bodem

Om de doorlatendheid (k-waarde) van de bodem te bepalen is een Hooghoudtproef uitgevoerd. Onderstaande grafiek toont het verloop van de grondwaterstand in de tijd. Op basis hiervan is een doorlatendheid vastgesteld van 0.19 m/d.



Figuur 3.39. Resultaat Hooghoudtproef perceel Klaver

Verloop van de grondwaterstand

De grondwaterstand op het perceel stijgt in natte perioden tot enkele centimeters onder het maaiveld en daalt in droge perioden tot meer dan 1.70 meter onder het maaiveld. De ondiepe buis op 10 meter vanaf de sloot valt in het merendeel van de zomerperiode droog. In bijlage 3a-3c zijn de gemeten grondwaterstanden in grafieken opgenomen. Hieronder zijn enkele resultaten met elkaar vergeleken en in context geplaatst.

Grondwaterstand verschil diep – ondiep filter geeft informatie over verticale richting stroming

Het verschil in tussen de gemeten grondwaterstanden tussen buis 10a en 10b geeft aan of er sprake is van neergaande flux of opwaartse flux (Figuur 3.40 en bijlage 3b). Gedurende een natte periode (winter) ligt in buis 10 de stijghoogte in het diepe filter wat lager dan de stijghoogte van het ondiepe filter. Er hier sprake van een neerwaartse flux. In tegenstelling tot perceel Swart lijkt hier tijdens de gehele periode sprake van een neerwaartse gradiënt. De ondiepe peilbuis valt helaas droog tijdens het grootste deel van

de droge periode. De beperkte meetdata in deze periode geeft echter wel de indruk dat ook in deze periode geen sprake is van een opwaartse flux tussen de greppels. In de periode van begin april kruisen de grondwaterstanden van 6a en 6 b van perceel Swart elkaar. Hier is dat niet het geval en blijft de grondwaterstand in het ondiepe filter boven dat van het diepe filter.

Verloop grondwaterstand tussen de greppels en sloot

In bijlage 3c GW perceel Klaver zijn grafieken opgenomen met maandelijkse grondwaterstanden langs de meetraai. Interessant zijn de verschillen tussen de reeksen van peilbuis 2m, 10m en daarna de andere buizen op 14 tot 24m vanaf de sloot. In de natte periode ligt de grondwaterstand dichterbij de sloot lager dan verder op. Dit duidt op een opbolling. In de droge periode keert dit beeld om. De grondwaterstand bij de sloot ligt dan hoger bij de sloot en de opeenvolgende buizen naar het midden van het perceel liggen daaronder. Dit duidt op een inbolling. Het effect van in- en opbolling reikt echter tot aan de eerste greppel. Het systeem tussen de greppels lijkt autonoom te reageren. In een natte periode (winter) is er sprake van opbolling tussen de greppels. In de zomermaanden zakt de grondwaterstand uit tot onder het niveau van de greppels en is de grondwaterstand niet langer beïnvloed door de greppels.

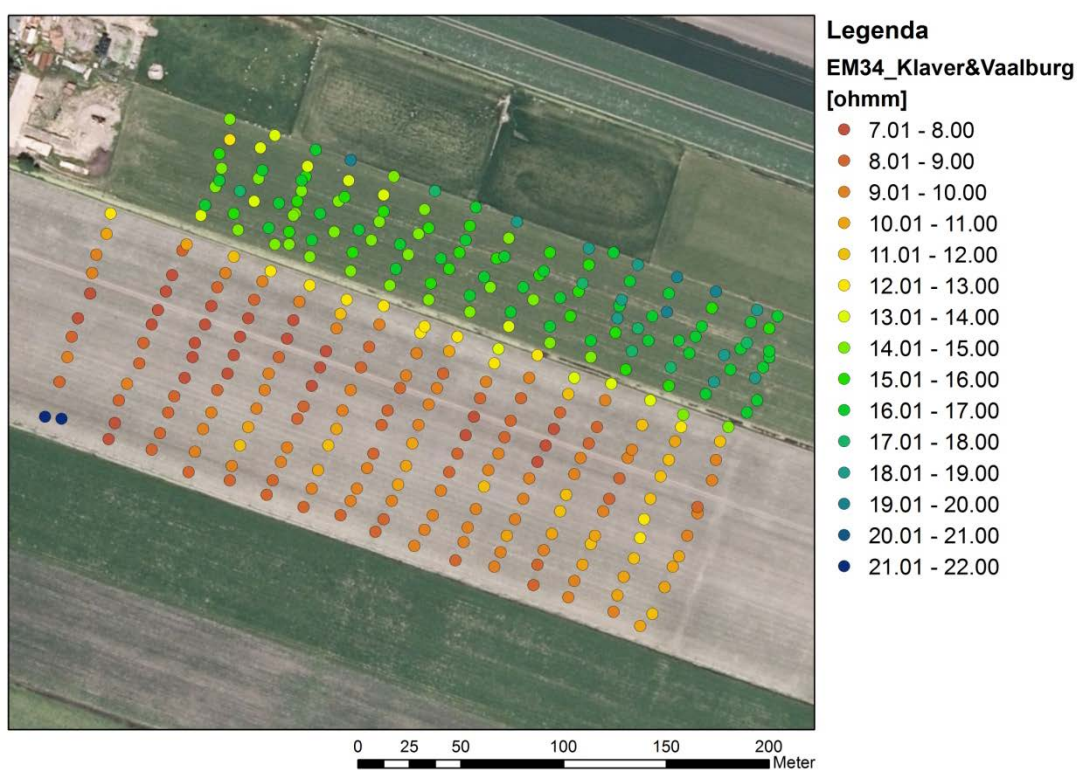


Figuur 3.40 Gemeten verloop van de grondwaterstand in diepe en ondiepe filter voor alle peilbuizen (boven) en peilbuis 10a/b (midden). Het maaiveld ligt bij peilbuis 10 op ongeveer -382cm NAP. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter.

Ruimtelijke geleidbaarheidsmetingen met de EM34 methode

Op het perceel is eenmalig in mei 2009 met de EM34 methode een reeks profielen gelopen waarbij om de 20 meter een meting is uitgevoerd. De EM34 geeft informatie over ruimtelijke variatie van zoutgehalte en/of lithologie van het perceel. De metingen geven de gemiddelde geleidbaarheid over een diepte van ca. 10m. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.41 waarbij gemeten geleidbaarheid is geconverteerd naar een waarde van de weerstand.

Er zijn twee duidelijke patronen te herkennen, minder duidelijk maar vergelijkbaar met dat van perceel Swart. In de eerste plaats is de weerstand bij de greppels lager dan de waarden in het midden tussen de greppels. De weerstand is over het gehele perceel is ca. 16 Ohmm terwijl in de greppels de waarden wat lager liggen rond de 14 Ohmm. In de tweede plaats neemt de weerstand toe van het westen naar het oosten. Beide patronen lijken verband te hebben met het zoutgehalte en niet met lithologie. De hogere weerstand tussen greppels duidt op de aanwezigheid van een neerslaglens tussen de greppels. Het tweede patroon is gerelateerd aan het oplopende maaiveld van west naar oost.

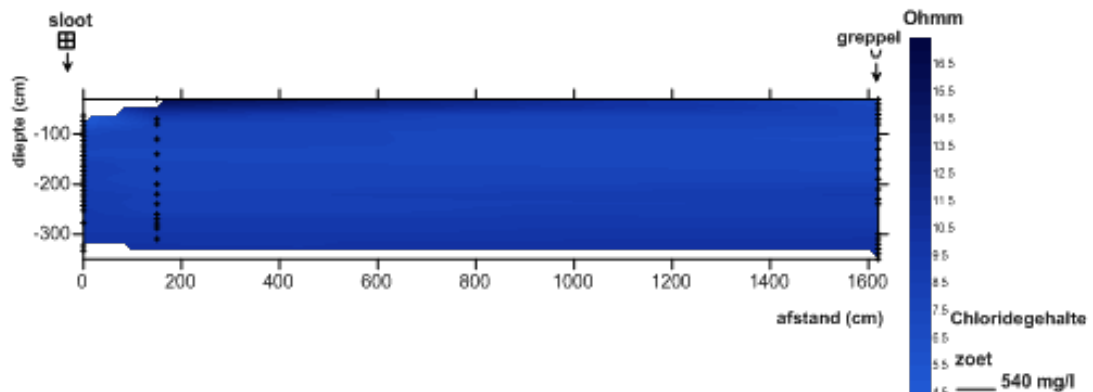


Figuur 3.41 EM34 perceel Klaver (boven) en Vaalburg (onder), mei 2009

Geleidbaarheidsmetingen met de prikstok

Naar aanleiding van het patroon dat uit de EM34 resultaten naar voren komt zijn aanvullende metingen met de prikstok en CVES uitgevoerd. Op het perceel zijn prikstokmetingen gedaan langs de raai waar ook de peilbuizen staan. De prikstokmetingen op het perceel komen vanwege de hoge wrijvingsweerstand van de diepere ondergrond niet verder dan 350 cm -mv. Er zijn 3 metingen verricht. In alle drie de metingen werden relatief hoge weerstanden gemeten. De gemeten waarden zijn vertaald naar een chlorideconcentratie op basis van een vastgestelde formatiefactor van 1 (Figuur 3.42). Deze formatiefactor is berekend met een geleidbaarheidsmeting van het grondwater in een boorgat.

Op basis van de prikstokmetingen is te concluderen dat een neerslaglens tot een diepte van tenminste 3.5m –mv aanwezig is. Uit de prikstokmeting is niet af te leiden welke invloed de greppels en sloot hierop op hebben.

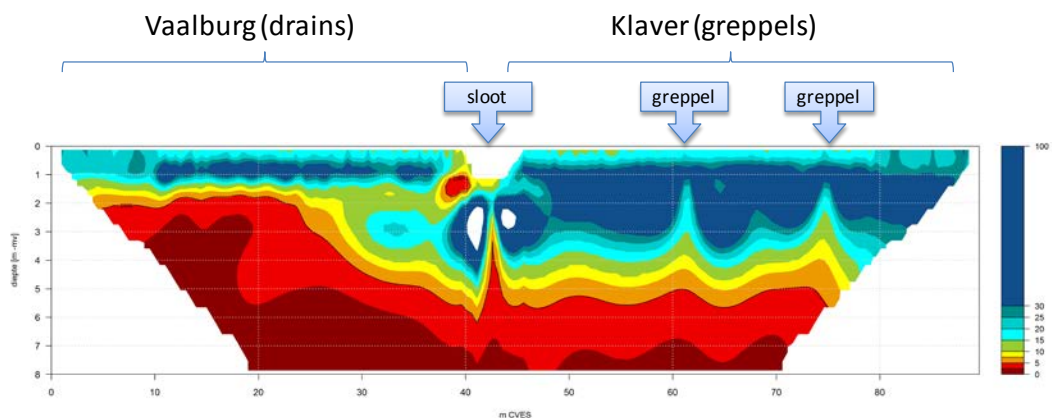


Figuur 3.42 Prikstokmeting perceel Klaver, mei 2009. Omrekening van weerstand naar chloride met formatiefactor van 1.

Geleidbaarheidsmetingen met de CVES

De eerste CVES meting op het perceel is een combinatiemeting met het naastgelegen perceel van Vaalburg in mei 2009 geweest (Figuur 3.43). Het deel van perceel Vaalburg wordt later besproken. Uit de prikstok meting is al gebleken dat er neerslaglensen van zoet water aanwezig zijn. Uit de EM34 meting bleek dat de weerstand onder de greppel wat lager is wat er op kan duiden dat hier wat brakker water aanwezig is.

Met de CVES methode blijkt het watersysteem en zoet-zoutverdeling goed in beeld te kunnen brengen. De metingen bevestigt de meting van de prikstok, de neerslaglens reikt tot een diepte van ruim 4m. Naast de neerslaglens wordt uit deze CVES meting duidelijk dat er brak water stroomt naar de greppel en de sloot.

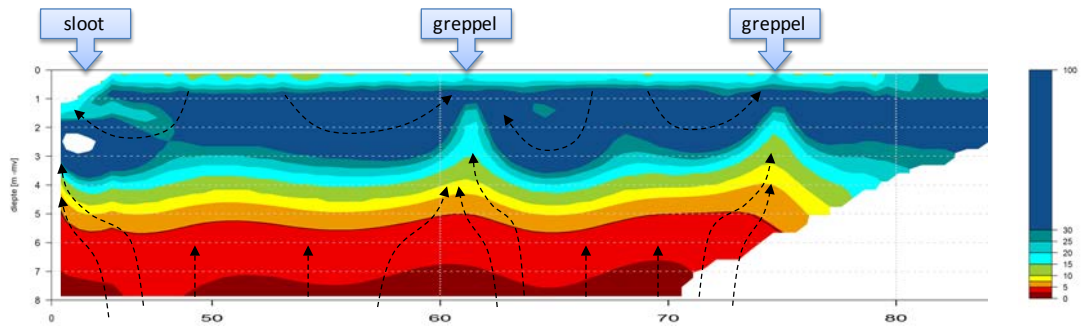


Figuur 3.43 CVES meting perceel Klaver (rechts) en Vaalburg (links), mei 2009. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/l berekend met een formatiefactor van 3. Onder de sloot is een weerstand hoger dan 100 Ohm m zichtbaar (wit), dit is waarschijnlijk een artefact van de inversiemethode (de elektroden hangen hier in het water).

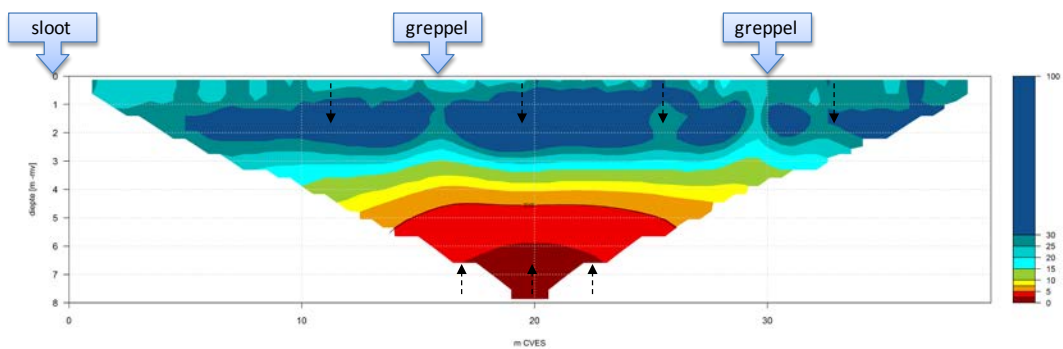
In de jaren erna zijn CVES metingen herhaald ter hoogte van de raai met de peilbuizen 1-10 vanaf de sloot op dezelfde plek als de eerste CVES meting. Het betreft achtereenvolgens een meting in oktober 2009 (Figuur 3.45) en april 2010 (Figuur 3.46). De (kleur)schaal van de figuren is gelijk.

In de meting van april 2010 is tevens de geïnterpreteerde stroming voor een natte periode ingetekend waarbij de greppels actief zijn. Opvallend is dat in het midden van de

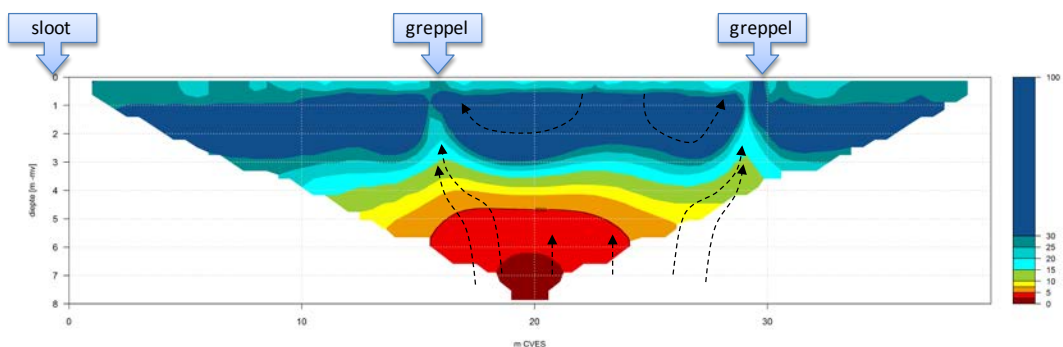
greppels een lichte brakke water omhoog komt. De interpretatie is dat dit samenvalt met de waterscheiding van de regenwaterlens. De stroomsnelheid is hier heel laag waardoor de kwel meer invloed heeft. Hetzelfde is beeld is zichtbaar in de meting van mei 2009. In de meting van oktober 2009 is dit veel minder. Deze meting is geeft de situatie weer voor een droge periode. Doordat er in zo'n periode geen grondwater aanvulling is wordt het brakke en zoet water niet langer begrensd door de stromingssystemen van de greppels. In plaats daarvan zakt het uit en neigt naar een horizontale overgang van zoet naar brak.



Figuur 3.44. CVES meting perceel Klaver, mei 2009. Weerstand in Ohm. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3.



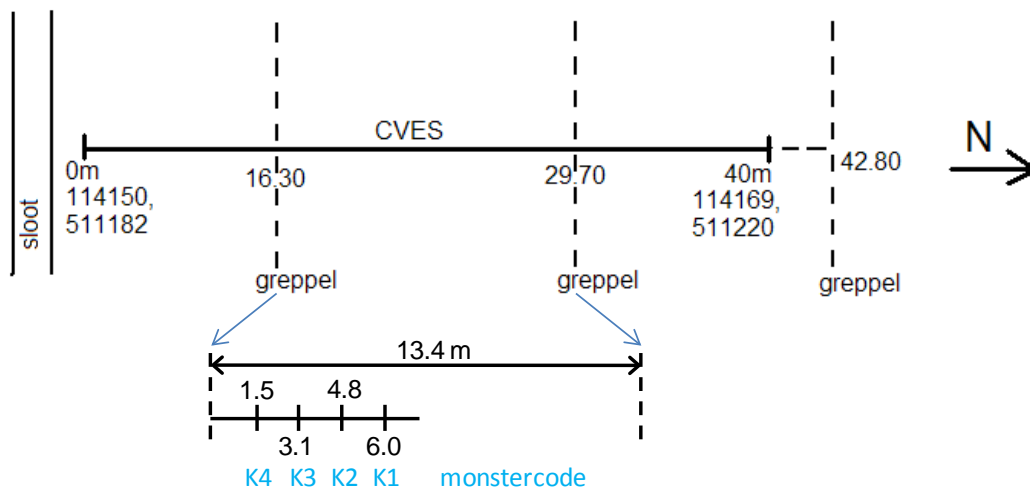
Figuur 3.45 CVES meting perceel Klaver, oktober 2009. Weerstand in Ohm. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3.



Figuur 3.46 CVES meting perceel Klaver, april 2010. Weerstand in Ohm. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/I berekend met een formatiefactor van 3. Grondwaterstand ligt op 65 cm –mv dicht bij de sloot en op 80 cm –mv in het midden van de CVES. In stipellijnen de geïnterpreteerde stroming in deze natte periode.

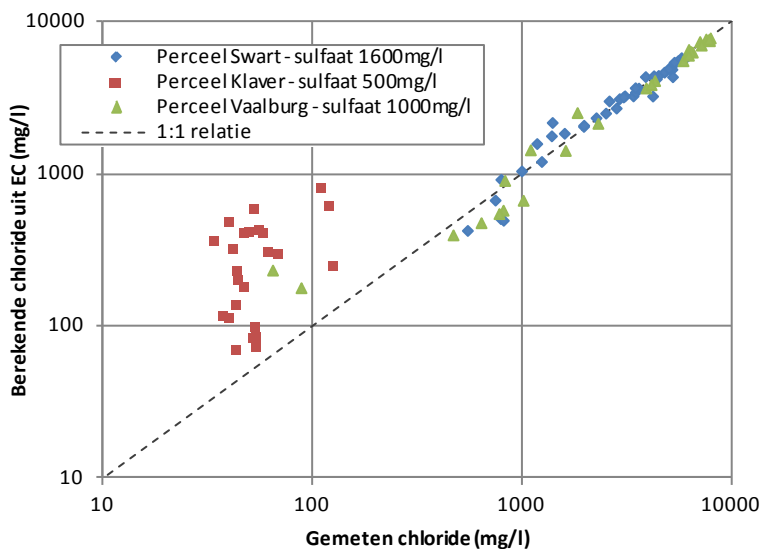
Bodemmonsters

In april 2010 zijn op verschillende diepten bodemmonsters genomen op de locatie van de CVES. Monsters zijn genomen op 22.3 meter (K1), 21.1 meter (K2), 19.4 meter (K3) en 17.8 meter (K4) van de CVES meting. Op dezelfde plekken zijn prikstokmetingen uitgevoerd.



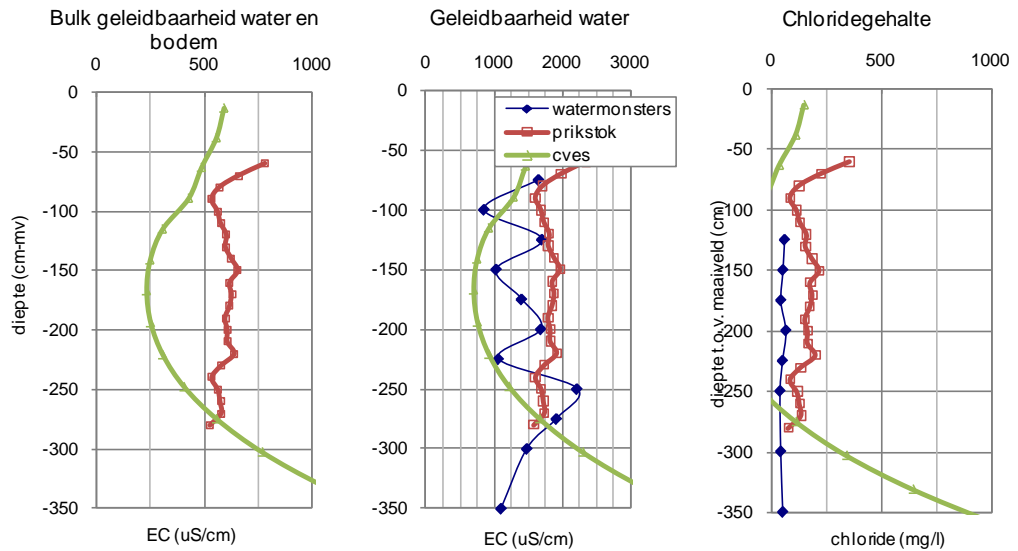
Figuur 3.47. Situatieschets van CVES en locaties van bodemonmonstername, april 2010.

De watermonsters hebben een overweldigende hoeveelheid data opgeleverd. Dit rapport beperkt zich tot de uitwerking van chloride. De overige analyseresultaten van waterchemie en zuurstofisotopen zijn wel opgenomen in bijlage 8.



Figuur 3.48. Relatie gemeten chloride uit watermonsters en berekend chloride op basis van gemeten EC uit watermonsters en een vaste waarde voor sulfaat voor de drie percelen in de Schermer. Beide assen in log-schaal om de spreiding in het lage bereik van perceel Klaver inzichtelijk te maken.

In paragraaf 3.4.2 is voor perceel Swart uiteengezet hoe met de bulkweerstand van bodem en water de EC en chloride van het grondwater kan worden berekend. De metingen (zie Figuur 3.49) tonen lage waarden voor de geleidbaarheid. De relatie om van een bulkweerstand tot een chloridegehalte heeft echter een grote onzekerheid bij een lage geleidbaarheid. De metingen op het perceel van Klaver tot een diepte van 3.5m vallen in zijn geheel binnen dit onzekere bereik. Daarbij komt dat ook in het perceel van Klaver hoge sulfaatgehalten voorkomen (zie paragraaf 3.4.2). De berekening van een bulkgeleidbaarheid van prikstok of CVES naar een chlorideconcentratie is daarom ook weinig zinvol. Wat wel uit de metingen blijkt is dat in alle gevallen een zoet water voorkomen wordt gemeten.



Figuur 3.49. Diepteprofielen van bodemopbouw (a); bulkgeleidbaarheid van bodem en water (b); geleidbaarheid watermonster gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (c); chloridegehalte gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (d).

3.4.4 Resultaten perceel Vaalburg

Beschrijving perceel

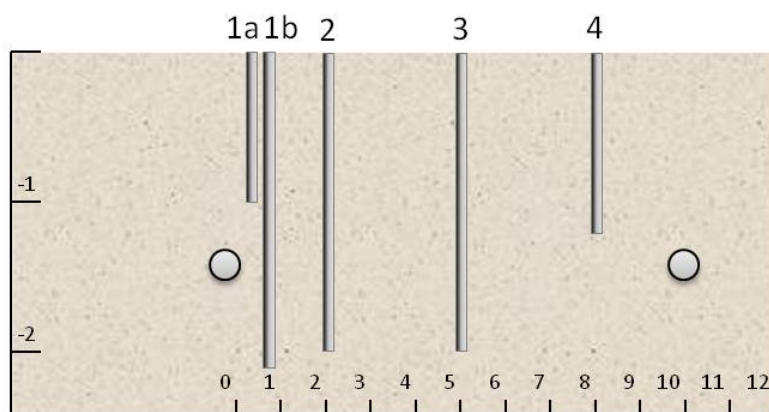
Het perceel van dhr. Vaalburg is een gedraineerd perceel waarop groenbemester verbouwd worden. Het perceel is 120m breed en ruim 900m lang. Het betreft een gedraineerd perceel dan alleen aan de zuidkant van het perceel afwatert (Figuur 3.35). Op de luchtfoto in Google Maps is duidelijk het drainagepatroon te herkenbaar (Figuur 3.50). De drainafstand is 10m en de drains liggen op een diepte van 1 m.



Figuur 3.50 Drainagepatroon perceel Vaalburg en locaties peilbuizen Vaalburg en Klaver (Google Maps).

Meetopstelling en uitgevoerde metingen

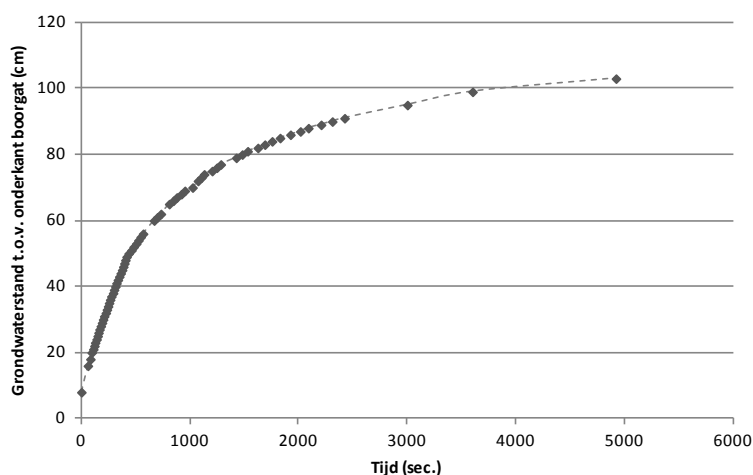
Over een raai van ongeveer 8 meter tussen twee drains zijn peilbuizen geplaatst (Figuur 3.37). In de buizen 1b, 2 en 3 zijn TD-divers gehangen, buis 1a en 4 zijn wekelijks met de hand gemeten. Buis 1a en 1b zijn op verschillende diepte geplaatst, de andere buizen zijn tot op ongeveer 2 meter diepte geplaatst. In de sloot aan de zuidzijde van het perceel staat een CTD-diver. Halverwege de meetperiode is gestart met metingen aan de afvoer van de twee drains (CTD-divers).



Figuur 3.51 Peilbuizen perceel Vaalburg. Drains op 0 en 10 meter. Afstanden en dieptes in meters.

Doorlatendheid van de bodem

Om de doorlatendheid (k-waarde) van de bodem te bepalen is een Hooghoudtproef uitgevoerd. Onderstaande grafiek toont het verloop van de grondwaterstand in de tijd. Op basis hiervan is een doorlatendheid vastgesteld van 0.19 m/d.



Figuur 3.52. Resultaat Hooghoudtproef perceel Vaalburg

Bodemopbouw

Tijdens het oriënterende veldbezoek op 21 april 2009 is de bodemopbouw van dit perceel beschreven. De locaties van de beschreven bodemprofielen is weergegeven in Figuur 3.38. Het perceel is gelegen naast het perceel van Klaver. De profielopbouw is redelijk uniform. De bouwvoor bestaat uit zware zavelgrond, maar is matig humeus. In vergelijking met de bovengrond van perceel Klaver zit er nog ongeveer tweederde deel aan humus in. Dit is een vrij normaal verschil tussen oud-grasland en bouwland. De bouwvoor is hier bovendien nog zichtbaar gemengd met humusarme ondergrond bij het ploegen. De kleiige laag onder de bouwvoor is 10 tot 20 cm dik en is iets lichter (=minder lutum) dan bij Klaver. De diepere ondergrond bestaat uit lichte tot zware zavelgrond. In

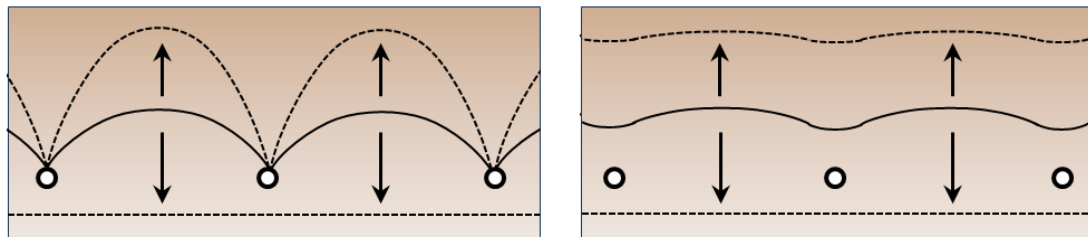
dit perceel wil het gras (voor graszaadteelt) niet makkelijk groeien. De bouwvoor is namelijk sterk verdicht en 'verkneet' bij de grondbewerking. Er komen alleen dunne wortels voor in deze grond. De wortels zoeken hun weg via de breukvlakken.

De kleigrond eronder is 'kneedbaar', poreus, iets beworteld en vochtig. De zavelgrond hieronder is blauwgrijs en poreus en er komt zowel oranje als fletse, verwaterde roest in voor. Zowel de kleur van de grond als van de roest wijst op vrij natte omstandigheden. Vanaf ongeveer 1 m -mv is de ondergrond grijsblauw en vanaf 1.20 m is de ondergrond blauw. Het grondwater stond op ongeveer 1 m -mv, ongeveer op drainniveau.

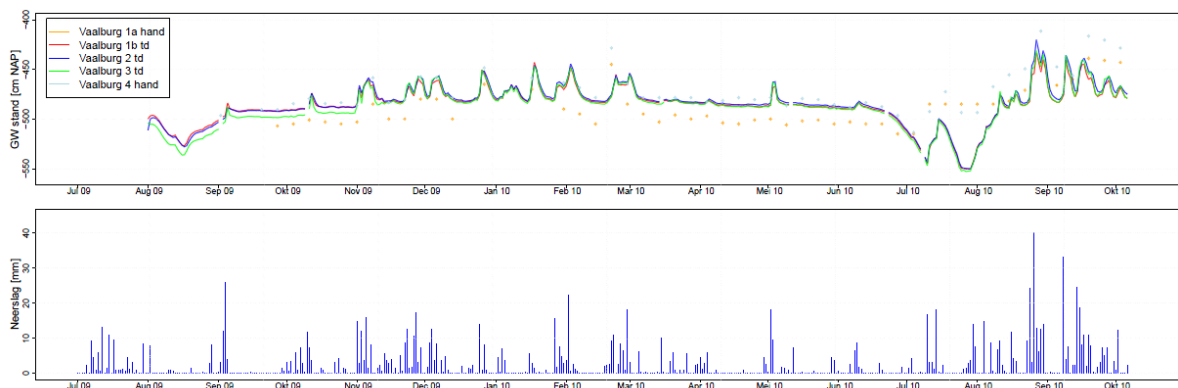
In dit perceel zit er in de ondergrond weinig lucht, minder dan in perceel Klaver. Het perceel is, zoals eerder aangegeven, gedraineerd op een diepte van 1 m en om de 10 m. De ontwatering wordt tegengewerkt door de dichte bovengrond, niet alleen blijft het water bij veel regen op het maaiveld staan, maar er ontstaat ook een vacuüm in de ondergrond. De drains voeren het teveel aan water maar langzaam af. Het grondwater fluctueert hier tussen 60 cm en 1.20 m -mv, te karakteriseren met een Gt VI.

Grondwaterstand verloop

De grondwaterstand op het perceel van dhr. Vaalburg tijdens de gemeten periode stijgt in natte perioden tot maximaal 20 centimeter onder het maaiveld en daalt in droge perioden tot maximaal 1.50 meter onder het maaiveld. In bijlage 4a en 4b zijn de gemeten grondwaterstanden in grafieken opgenomen. Hieronder enkele resultaten met elkaar vergeleken en in context geplaatst.



Figuur 3.53. Weergave van het verloop van de grondwaterstand bij een drain. Links het verloop zoals dit meestal wordt getekend en gemodelleerd. Rechts zoals de praktijk het in het perceel laat zien.



Figuur 3.54 Gemeten verloop van de grondwaterstand voor alle peilbuizen. Het maaiveld ligt op ongeveer -400cm NAP en het drainageniveau op ongeveer -500cm NAP. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter.

Verloop grondwaterstand tussen de drains

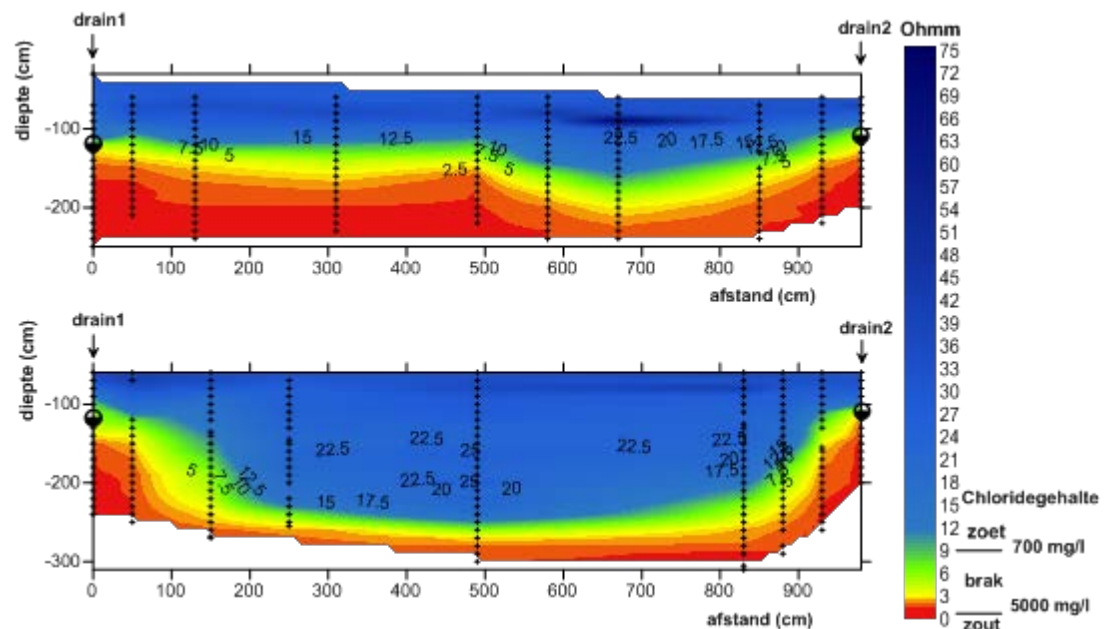
Plots van de grondwaterstand in de buizen 1 (bij drain) tot en met 3 (midden tussen drains) op het perceel laten vlak verloop tussen de drains zien. De grondwaterstand ligt door het jaar heen op ongeveer 20cm boven het drainniveau (opbolling) (Figuur 3.54). Er is vrijwel geen verschil in grondwaterstand vlakbij de drain en de grondwaterstand in het midden tussen de drains. Het verloop van de opbolling verloopt dus anders dan vaak wordt aangenomen (Figuur 3.53). Een dergelijk verloop wordt ook waargenomen in veenweide gebieden (pers. comm. Deltares, 2011). Overigens treedt ook in droge perioden wanneer de grondwaterstand beneden het niveau van de drain zakt een vlakke grondwaterspiegel op.

Geleidbaarheidsmetingen - EM34

Op het perceel van dhr. Vaalburg is om de 10 m tussen de drains gemeten (Figuur 3.41). De meetresultaten schetsen een vrij constant beeld van de weerstand, rond de 10 Ohmm, over het veld. Langs vrijwel de gehele noordelijk gelegen sloot is een hogere weerstand gemeten, rond de 12 Ohmm. Dit komt goed overeen met gemeten weerstanden in Figuur 3.43 waar onder het perceel brak water tot de drains reikt en bij de sloot zoeter water voorkomt.

Geleidbaarheidsmetingen - Prikstok

Naar aanleiding van het patroon dat uit de EM34 resultaten naar voren komt zijn aanvullende metingen met de prikstok en CVES uitgevoerd. Er zijn op twee raaien prikstokmetingen uitgevoerd. Raai 1 ligt 17.65 m van de sloot waarop gedraineerd wordt en bevat 10 meetpunten. De grens van hoge naar lage waarden ligt op de 120 cm -mv. Tussen de 6 en 8 m van drain 1 ligt die overgang duidelijk dieper op 180 cm -mv. Van een symmetrische zoetwaterlens is hier geen sprake. Mogelijk dat dit het gevolg is van de bodemopbouw.



Figuur 3.55 Prikstokmeting perceel Vaalburg raai 1 (boven) en raai 2 (onder), mei 2009. Tevens is indicatief de weerstand omgerekend naar chloride.

Raai 2 ligt 68 m van de sloot en bevat 9 meetpunten. Figuur 3.55 geeft het geïnterpoleerde resultaat. Tussen de drains is op een diepte van ongeveer 2.40 -mv een scherpe overgang van zoet naar zout grondwater. Ook duidelijk zichtbaar is het brakke water dat tot aan de drains reikt.

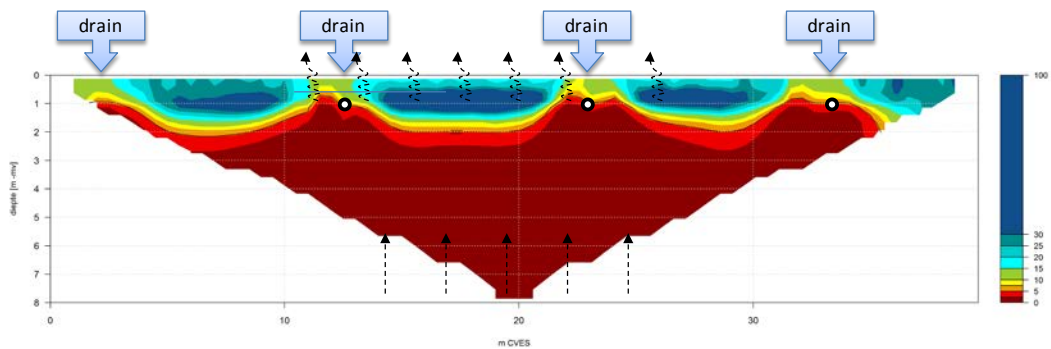
Geleidbaarheidsmetingen met de CVES

De eerste CVES meting op het perceel van dhr. Vaalburg is een combinatiemeting met het perceel van dhr. Klaver in mei 2009 geweest (Figuur 3.43). Bij Klaver heeft de zoetwaterlens een dikte van ca. 4m. In het deel van Vaalburg loopt de meting precies langs een drain waar het brakke water tot aan de drain reikt.

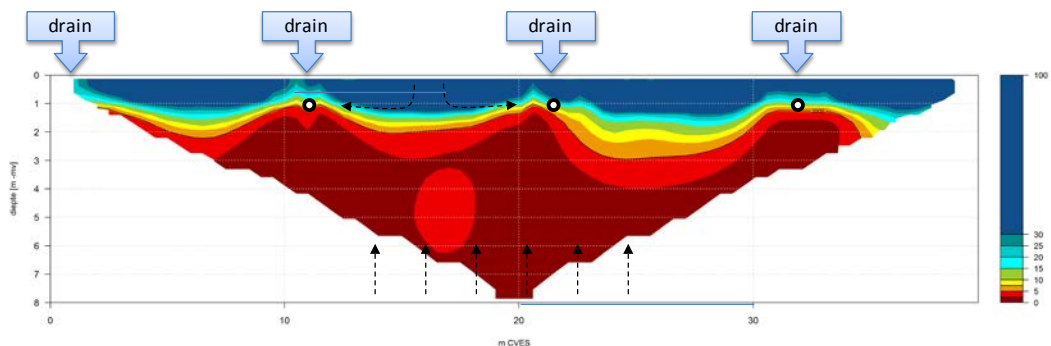
In oktober 2009 (Figuur 3.56) en april 2010 (Figuur 3.57) zijn CVES metingen ter plaatse van de raai met peilbuizen gedaan. Deze metingen staan dus loodrecht op de combinatiemeting Vaalburg-Klaver. De (kleur)scala van de figuren is gelijk.

In de metingen is tevens de geïnterpreteerde stroming ingetekend. De meting van oktober 2009 is representatief voor de droge periode. De grondwaterstand in de voorafgaande periode lag beneden het niveau van de drains. Als gevolg van neerslagtekort treedt er een capillaire flux op. Deze opwaarts gerichte flux zorgt er voor dat het zout bij de drains omhoog verplaatst tot boven de drains en mogelijk de wortelzone bereikt. In de meting zichtbaar door de lagere weerstanden.

De meting van april 2010 zou illustratief moeten zijn voor een natte periode. Opmerkelijk is echter de waargenomen afname van de neerslaglens. De verwachting zou zijn dat de neerslaglens na een natte periode weer aangevuld zou zijn. Zoals al eerder geconstateerd bij het perceel van Swart heeft er in deze winter gedurende de periode van half december tot februari vrijwel onafgebroken een sneeuwdek op het perceel gelegen. Tot in april was



Figuur 3.56 CVES meting perceel Vaalburg, oktober 2009. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/l berekend met een formatiefactor van 3. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de droge periode ingetekend.



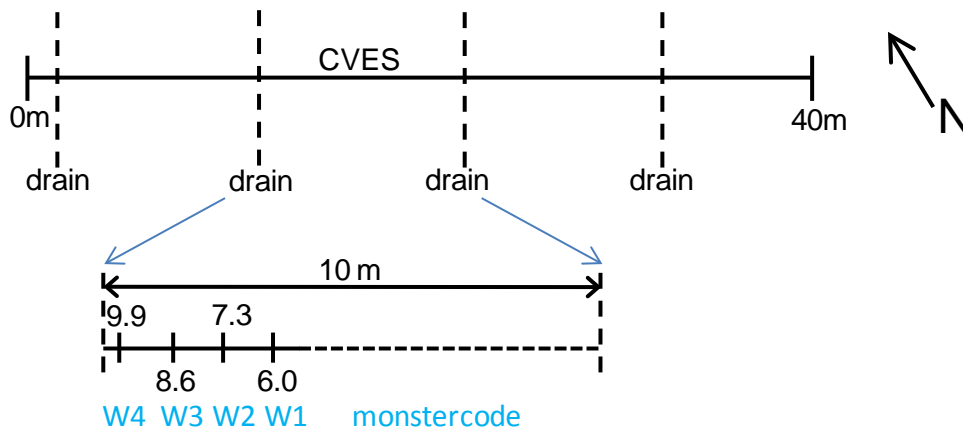
Figuur 3.57 CVES meting perceel Vaalburg, april 2010. Weerstanden in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/l berekend met een formatiefactor van 3. Grondwaterstand op 90 cm -mv. Met stippellijnen zijn de geïnterpreteerde stromingsrichting representatief voor de natte periode ingetekend.

er sprake van nachtvorst. Hierdoor kon in deze periode waarschijnlijk in geringe mate grondwateraanvulling plaatsvinden en kon de neerslaglens niet worden aangevuld.

Verder is te zien dat de weerstand boven de drains hoger in vergelijking tot de meting in oktober. Dit betekent dat er geen tot minder zout boven de drain aanwezig is en tijdens de natte periode voor een deel is uitgespoeld.

Bodemmonsters

In april 2010 zijn op verschillende diepten bodemmonsters genomen op de locatie van de CVES. Monsters zijn genomen tussen de drains op 6 meter (W1), 7.3 meter (W2), 8.6 meter (W3) en 9.9 meter (W4) van de CVES meting. Op dezelfde plekken zijn prikstokmetingen uitgevoerd.

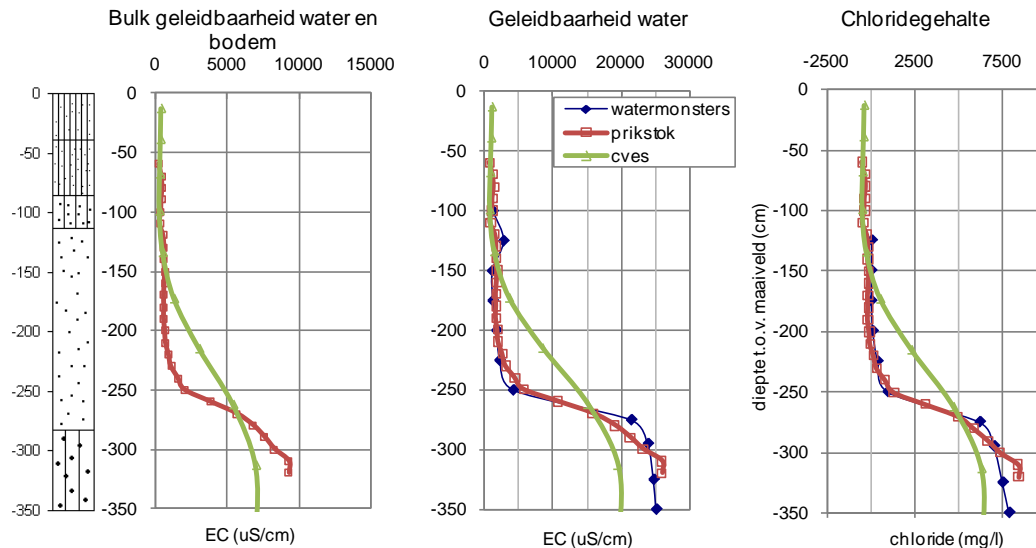


Figuur 3.58 Situatieschets van CVES en locaties van bodemmonstersname, april 2010.

De watermonsters hebben een overweldigende hoeveelheid data opgeleverd. Dit rapport beperkt zich tot de uitwerking van chloride. De overige analyseresultaten van waterchemie en zuurstofisotopen zijn opgenomen in bijlage 8.

Prikstokmetingen en CVES metingen meten de bulk geleidbaarheid van bodem en poriewater. In paragraaf 3.3 is beschreven hoe met de formatiefactor van geleidbaarheid de chlorideconcentratie kan worden geschat. Door nu gebruik te maken van de watermonsters kan een betere schatting gemaakt worden van de formatiefactor. Waar de prikstok een directe meting is van de geleidbaarheid op een gegeven diepte is dat niet het geval bij een CVES meting. De CVES doet een reeks metingen waarna met software een tweedimensionaal beeld wordt geïnterpreteerd. De interpretatie is op verschillende manieren te sturen. Het tweede doel van de watermonsters, naast het bepalen van de formatieweerstand, is dan ook de resultaten van de metingen van de prikstok en CVES te toetsen.

Voor de 4 monsterlocaties zijn diepteprofielen gemaakt op basis van de metingen van de prikstok, CVES (geconverteerd naar geleidbaarheid) en watermonsters. De bulkgeleidbaarheid is met een formatiefactor vertaald naar een geleidbaarheid voor water. Deze waarden zijn vergeleken met de gemeten geleidbaarheid van het water uit de watermonsters. Hieruit is een formatiefactor van 2.8 voor het hele diepteprofiel bepaald. Voor locatie W1 (zie Figuur 3.58) zijn deze weergegeven in Figuur 3.59. De figuur toont ook de resultaten voor de vertaling van geleidbaarheid naar het chloridegehalte.



Figuur 3.59 Diepteprofielen van bodemopbouw (a); bulkgeleidbaarheid van bodem en water (b); geleidbaarheid watermonster gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (c); chloridegehalte gemeten (watermonster) en berekend (CVES en prikstok) (d).

Geconcludeerd kan worden dat de berekende waarden op basis van de prikstokmetingen goed overeenkomen. Ook de uit de CVES afgeleide waarden komen goed overeen. De CVES interpretatie heeft wat moeite met de scherpe overgang, dit is ook zichtbaar in de andere 3 profielen.

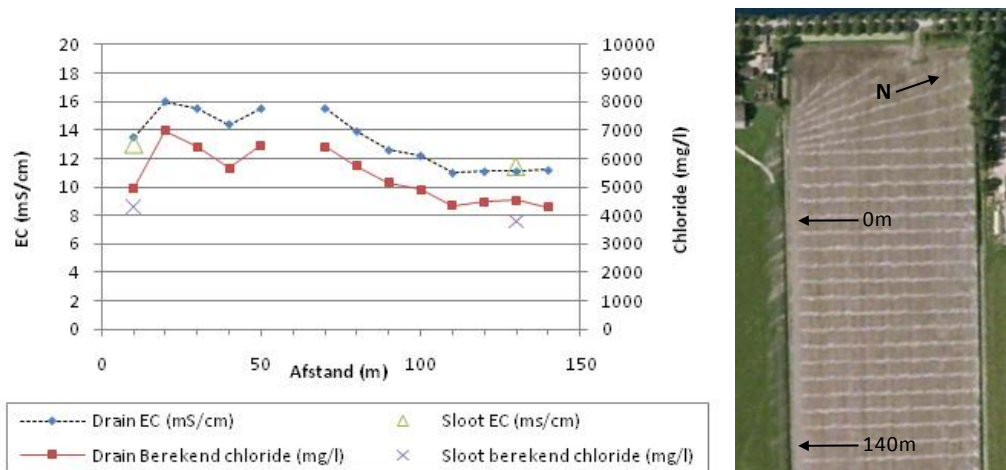
Bij de bespreking van de CVES metingen is opgemerkt dat uit de metingen naar voren komt dat er zich zout (brak water) boven het drainniveau kan bevinden. Dit is het duidelijkst in de meting van oktober 2009 en in mindere mate zichtbaar in de meting van april 2010. Het is tijdens deze laatste meting dat ook de watermonsters zijn genomen. De watermonsters met monstercode W4, dicht bij een drain, bevestigen de waarneming uit de CVES meting. Op een diepte van -100cm mv (drainniveau) is een concentratie van 1819 mg/l chloride aangetroffen. Op een diepte van -75cm mv (25 cm boven het niveau van de drain) is een concentratie van 820mg/l chloride aangetroffen. Dit betekent dat de waarden in oktober 2009 nog aanzienlijk hoger zullen zijn geweest.

De resultaten geven voldoende vertrouwen dat de variaties in meetwaarden in een gemeten 2D profiel van de CVES ook werkelijke variaties in de weerstand / geleidbaarheid representeren.

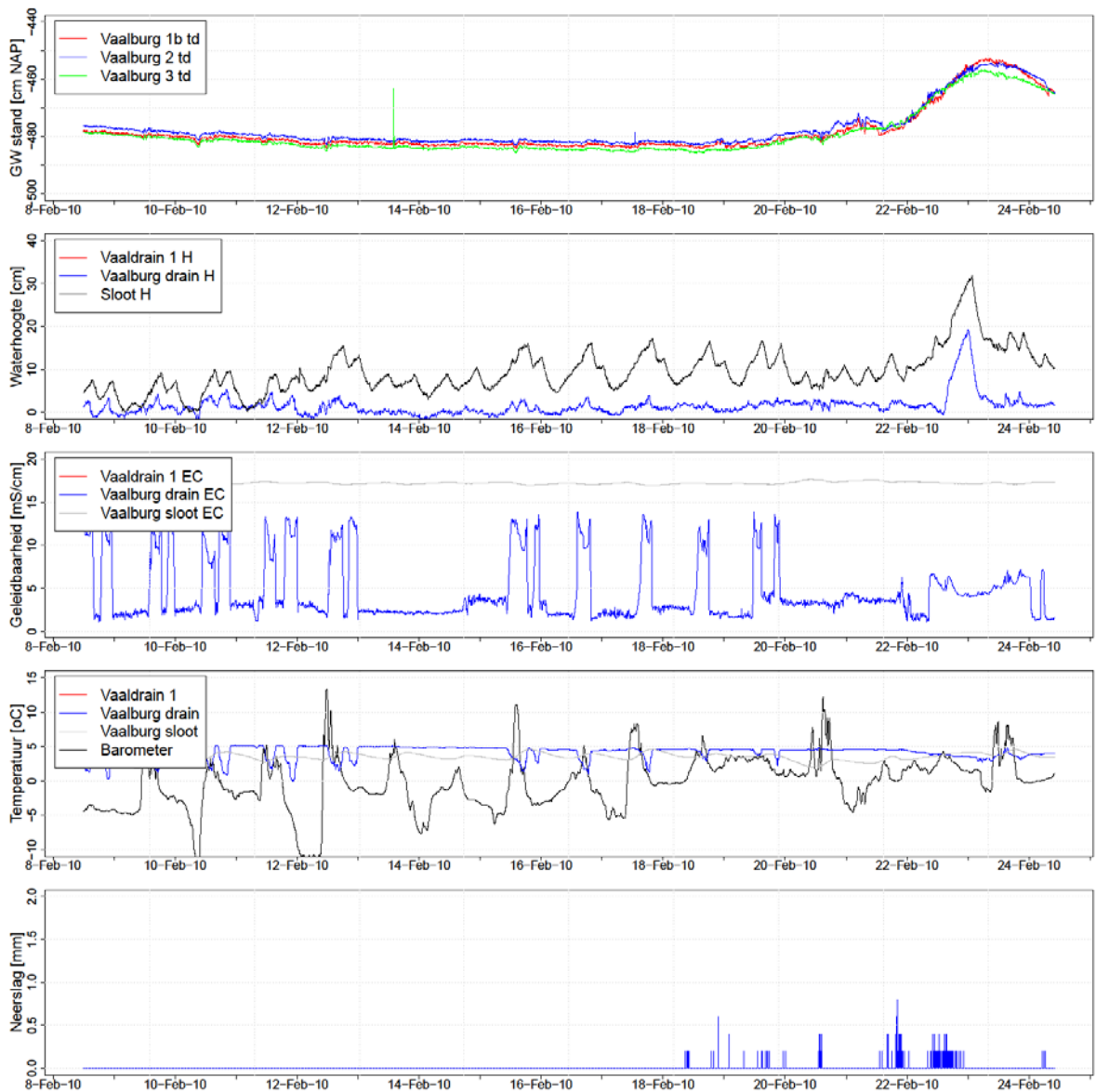
Afvoer

De hoeveelheid afvoer van het perceel van dhr. Vaalburg is niet gemeten, maar kwaliteitsmetingen in de drains en de sloot geven wel informatie over de afvoer van het perceel (bijlage 5).

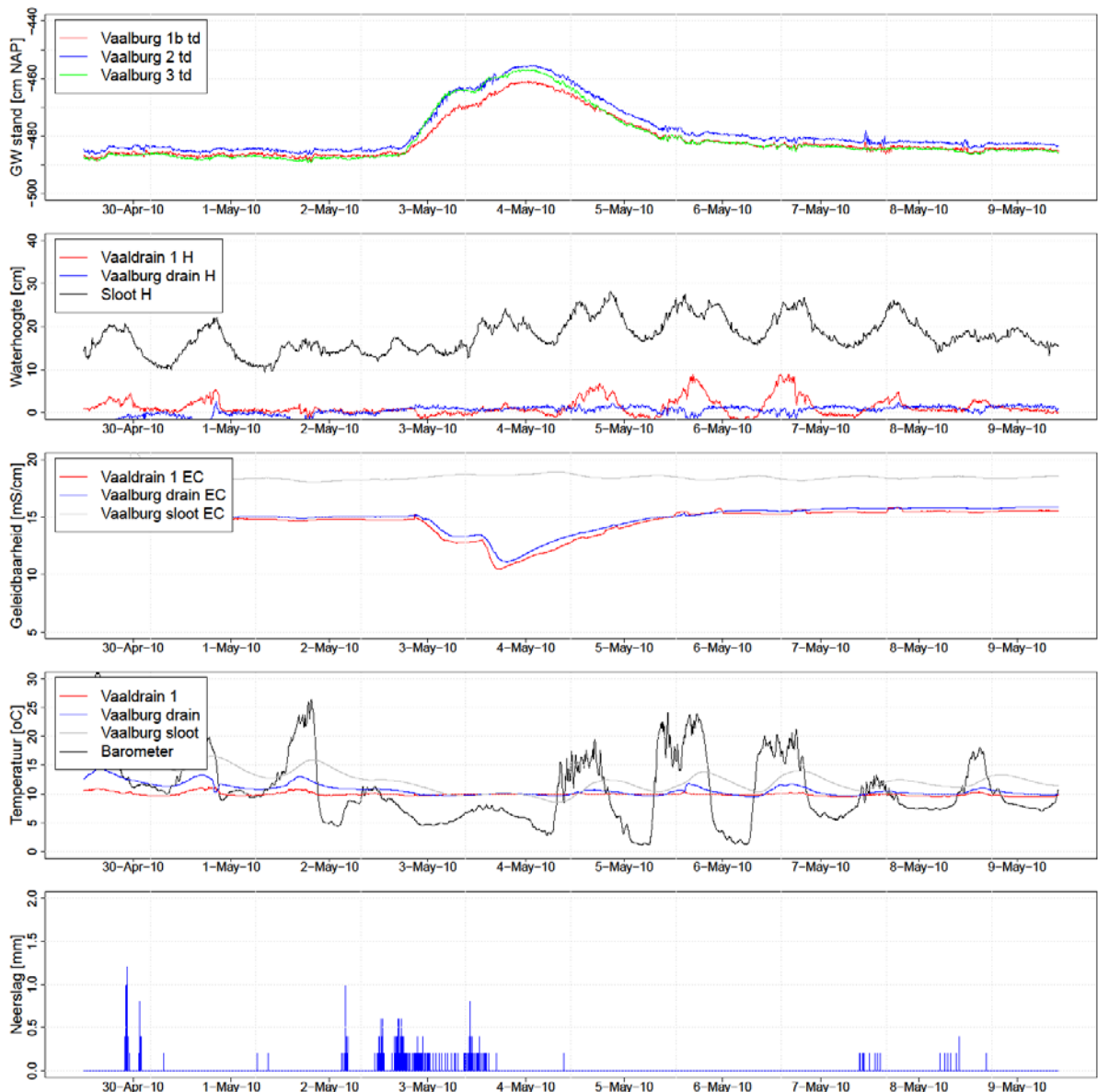
Twee drains ter hoogte van de raai met peilbuizen zijn continue bemeten. Eerder, op 15 april 2009, zijn metingen gedaan aan het chloridegehalte van de afvoer van alle drains (Figuur 3.60). De chloridegehalten liepen op dat moment af richting het oosten.



Figuur 3.60 Chloridegehalte drainafvoer [g/m³] op het perceel van dhr. Vaalburg op 15 april 2009.



Figuur 3.61 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); EC drain en sloot [mS/cm] (2); Temperatuur drain, sloot en barometer [oC] (3) en Neerslag [mm] (4) op perceel Vaalburg voor februari 2010.

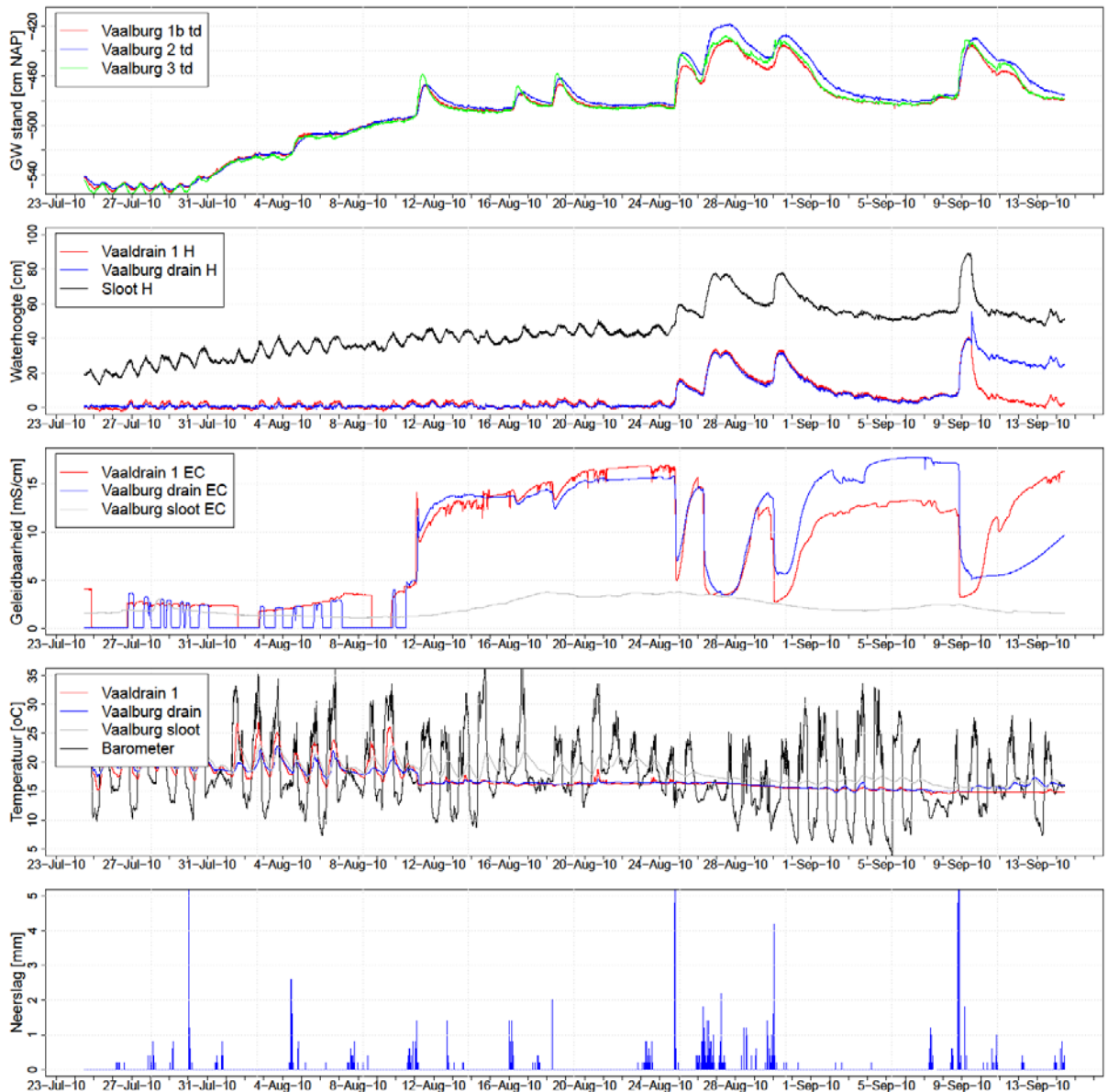


Figuur 3.62 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); Gemeten waterhoogtes [cm] (2); EC drain en sloot [mS/cm] (3); Temperatuur drain, sloot en barometer [oC] (4) en Neerslag [mm] (5) op perceel Vaalburg voor begin mei 2010.

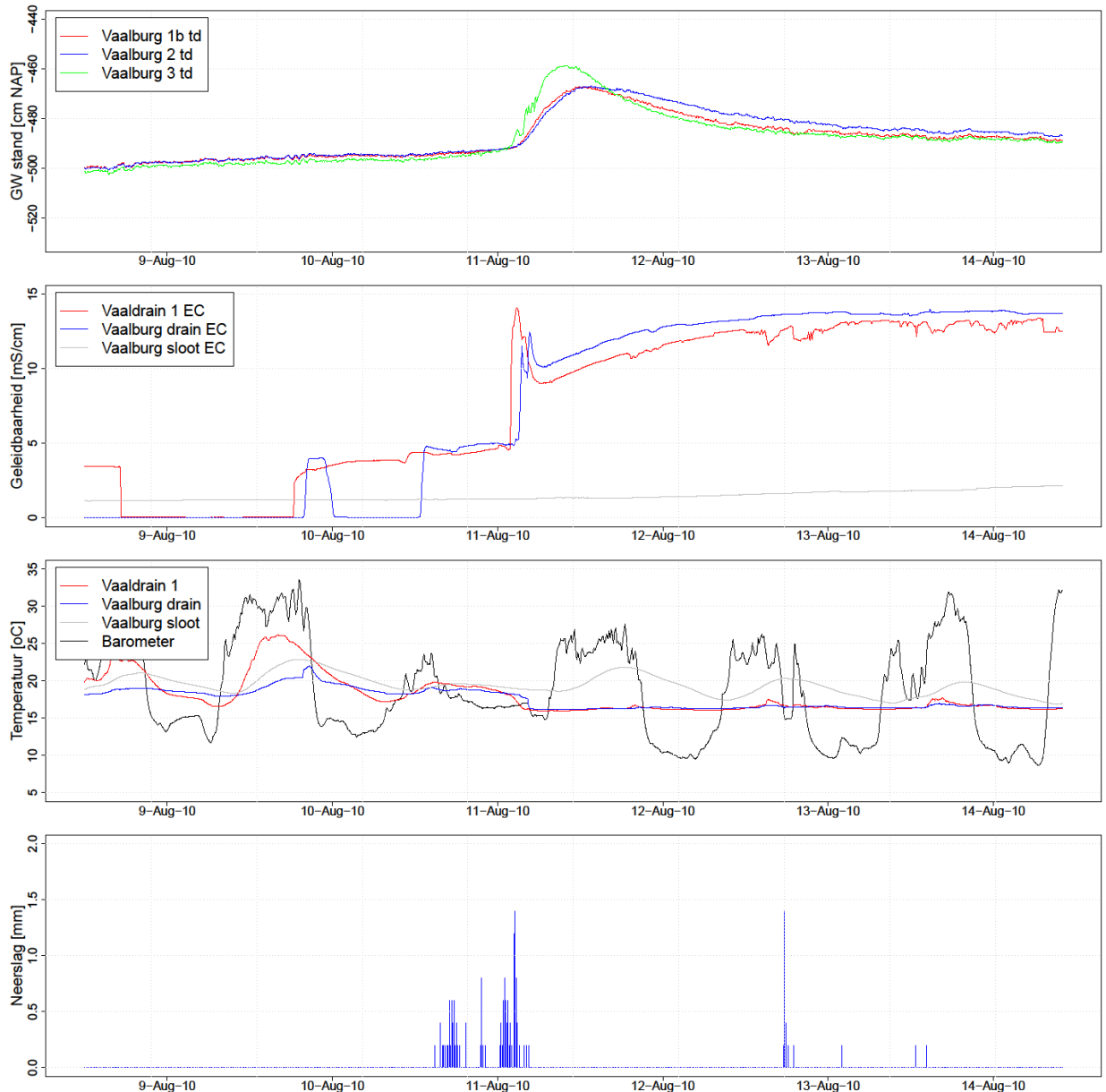
In de wintermaanden januari – maart 2010 heeft de EC zoals gemeten in de drain een waarde van ongeveer 2 mS/cm met pieken tot ongeveer 8 mS/cm (Figuur 3.60). De draintemperatuur ligt steeds iets boven de sloottemperatuur, een indicatie dat de drains afvoeren. Waar de pieken in EC optreden is een daling in draintemperatuur (richting nul) en een stijging in barometertemperatuur waarneembaar. Uit veldwaarnemingen blijkt dat er in de wintermaanden sneeuw en ijs lag. Wanneer de barometertemperatuur boven nul komt, is er dus sprake van sneeuwsmelt en bijbehorende afvoer (met temperaturen tegen de nul graden). Dit verklaart de veranderingen in drain EC ook wanneer er geen neerslag valt.

Tijdens de maanden april – mei 2010 ligt de EC van de drains boven de 10 mS/cm en stijgt langzaam. Neerslag op 2 en 3 mei zorgt voor een tijdelijke daling van de EC. Interessant is dat waargenomen vertraging van de geleidbaarheid ten opzichte van de neerslag. De neerslag begint halverwege de dag van 2 mei. De afstroming van de drains, vertaald naar een daling van de EC, wordt een halve dag later waargenomen.

In de maand juli en begin augustus 2010 vallen de drains enkele malen droog (Figuur 3.63). Dit valt af te leiden uit de temperatuur zoals gemeten in de drains (vertoont hetzelfde dag-nacht ritme als de gemeten buiten temperatuur) en de EC (is nul wanneer de drain droog valt). De EC van de drains vertoont enkele pieken tot ongeveer 5 mS/cm, de oorzaak ligt in kleine afvoerhoeveelheden (op dat moment is er ook een kleinere amplitude van het dag-nachtritme van de temperatuur in de drains dan van de buitentemperatuur). Vanaf 11 augustus stijgt de EC van de drains tot boven 10 mS/cm. De temperatuur van het drainwater ligt lager dan de barometer- en sloottemperatuur en vertoont geen dag-nachtritme. Dit wordt veroorzaakt door een constante afvoer van de drains.



Figuur 3.63 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); Gemeten waterhoogtes [cm] (2); EC drain en sloot [mS/cm] (3); Temperatuur drain, sloot en barometer [°C] (4) en Neerslag [mm] (5) op perceel Vaalburg voor 23 juli – 14 september 2010.



Figuur 3.64 Van boven naar beneden: Grondwaterstand [cm NAP] (1); EC drain en sloot [mS/cm] (2); Temperatuur drain, sloot en barometer [°C] (3) en Neerslag [mm] (4) op perceel Vaalburg voor 9 – 14 augustus 2010.

Vanaf 10 september is er een verschil in gemeten waterhoogte tussen de twee drains, dit wordt veroorzaakt doordat de diver (Vaalburg drain) door de hevige neerslag in de sloot is terecht gekomen.

Bijzonder interessant en van belang in relatie tot de waarnemingen en hypothese op basis van de CVES metingen en watermonsters is de ontwikkeling van de EC op de dagen van 10 en 11 augustus. Eerder is op basis van de CVES meting van oktober 2009 is geconcludeerd dat in droge perioden als gevolg van neerslagtekort er een capillaire flux optreedt. Deze opwaarts gerichte flux zorgt er voor dat het zout bij de drains omhoog verplaatst tot boven de drains en mogelijk de wortelzone bereikt. Een tweede meting van april 2010 in de natte periode geeft aan dat er geen tot minder zout boven de drain aanwezig is. Dit zout is in de natte periode geheel of ten dele uitgespoeld. De

watermonsters uit deze zelfde periode hebben laten zien dat op 25cm boven de drains nog altijd een chloridegehalte van ruim 800 mg/l is aangetroffen.

Een nadere blik op het verloop van de EC op 10 en 11 augustus 2010 laten het volgende zien. Op de tweede helft van 10 augustus begint het te regenen. In de periode hiervoor is alleen zo nu en dan sprake van een zeer geringe afvoer. Als gevolg van de regen op 10 en 11 augustus stijgt de grondwaterstand verder en begint de drain af te voeren. Dit vertaalt zich eerst in een uitschieter van de EC in beide drains. In onze interpretatie is deze uitschieter het gevolg van uitspoeling van zout dat zich boven en naast de drain bevindt. Daarna daalt de EC om daarna weer toe te nemen. Dit is de afvoer van het zoet neerslag water (daling van de EC) en daarna de afvoer van brak kwel water. In de periode erna herhaald zich dit patroon. Een daling van de EC bij neerslag, met een snelle afvoer component via macro poriën, en een toename van de EC zolang de grondwaterstand zich boven het drainniveau bevindt en dus afvoer mogelijk is.

3.4.5 Resultaten perceel Visser

Beschrijving perceel

Het perceel van dhr. Visser is een gedraineerd perceel waarop in het eerste meetjaar aardappelen zijn verbouwd en in het tweede meetjaar tulpen. Het perceel is ruim 900m lang en 240m breed. Het betreft een gedraineerd perceel dat afwatert in de middensloot. De drainageafstand wisselt. Sinds de drooglegging is er drie maal drainage aangelegd. De eerste drainage stamt uit de periode van de drooglegging en in veel gevallen functioneert dit systeem nog altijd.



Figuur 3.65 Perceel Visser, overzicht metingen.

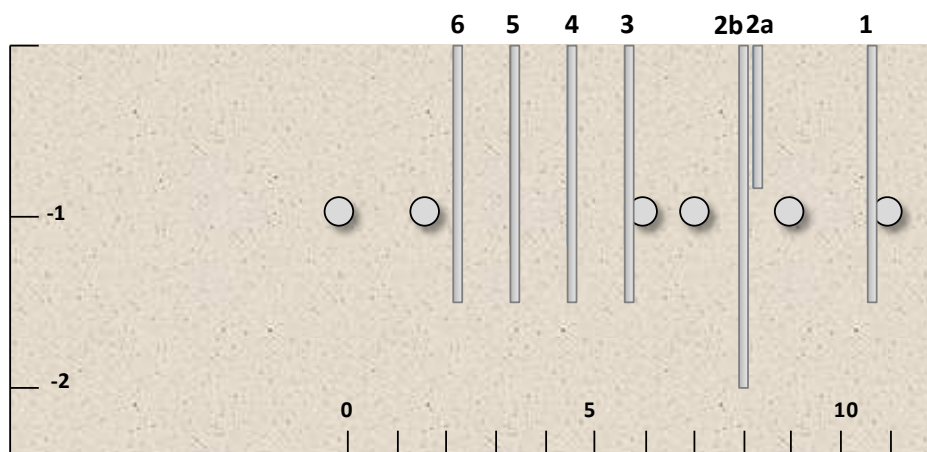
Meetopstelling en uitgevoerde metingen

Over een raai van ongeveer 8 meter zijn peilbuizen geplaatst parallel aan de middelsloot en loodrecht op de drains (Figuur 3.65). In de buizen 1, 2a, 3, 4 en 5 zijn TD-divers geplaatst, in buis 2b is een CTD-diver geplaatst. In buis 6 is periodiek handmatig de grondwaterstand gemeten. Buis 2a en 2b zijn op verschillende diepten geplaatst, respectievelijk met een filter op 1m-mv en 2m-mv, de andere buizen zijn tot op ongeveer 1.5m-mv meter diepte geplaatst. Halverwege de meetperiode is gestart met metingen aan de afvoer van twee drains (CTD-divers).

De totale afvoer van het perceel is continue gemeten. Hiervoor in de sloot ongeveer halverwege van het perceel een meetschot geplaatst (zie 3.3.10, meetschot achter) en aan het begin van de sloot (waar water wordt ingelaten, meetschot voor). De afvoer is daardoor afkomstig van het perceel en/of van inlaatwater. Bij het ontwerp van het meetschot is rekening gehouden met de te verwachten afvoeren. Uitgegaan is van een neerslaghoeveelheid van 15mm/d dat in één keer tot afvoer komt en van een lage afvoer van 0.3mm/d (minimale kwelflux). In het eerste geval moet de opening de betreffende hoeveelheid kunnen verwerken en niet te veel opstuwten. In het tweede geval moet er voldoende stuwning zijn dat er water blijft lopen. Op basis hiervan is besloten tot een V opening met een hoek van 45°. Voor elk meetschot is een CTD-diver geplaatst in combinatie met een barometer waarmee de waterhoogte is gemeten. Behalve de totale afvoerhoeveelheid wordt met de CTD diver ook de kwaliteit van het water gemeten. Ten slotte is er halverwege de meetperiode een CTD diver geplaatst in twee van de drains van recente ouderdom bij de meetraai. Deze hebben als doel het verloop van de waterkwaliteit bij afvoer uit de drains te volgen.

Om ook een goed beeld te krijgen van de kleinschalige variaties in de neerslag op het perceel is een regenmeter geplaatst. Deze staat opgesteld vlak bij de meetraai.

Naast deze permanente meetopstelling zijn periodieke metingen uitgevoerd. Het betreft CVES metingen te plaatse van de raai met peilbuizen.



Figuur 3.66 Peilbuizen perceel Visser. Oude en nieuwe drains op diverse locaties. Afstanden en dieptes in meters.

Bodemopbouw

Deze twee percelen liggen vlak naast elkaar en worden gescheiden door een kavel-sloot. Bij de uitvoering van het veldonderzoek in 2009 stond er in het noordelijke perceel gras en in het zuidelijke aardappelen gepoot. In de percelen bestaat de bovengrond meest uit humusarme lichte zavelgronden, plaatselijk komen zeer lichte zavelgronden en zelfs zandgronden voor. Het zand is zeer fijn met een M50 of mediaan van 130 tot 140 mu. Ook de ondergrond is zavelig en beneden 1m vaak gelaagd. Plaatselijk komt het pleistocene zand net binnen 2 m -mv voor. Boven dit lemige zand komt een humusrijke laag of zelfs 40 cm veen voor.

In het perceel grasland komen de graswortels tot 60 cm –mv voor. De bouwvoor is ongeveer 35 cm dik, de onderste helft van de bouwvoor is op veel plaatsen vochtig. Onderin de bouwvoor op een diepte van 25-35 cm komen nog resten van aardappelplanten voor van vorig jaar. Op deze diepte komen ook blauwige reductievlekken voor in de donkergrijze grond. Vaak is de overgang van bouwvoor naar ondergrond scherp en vrij hard.

Onder de bouwvoor is de grond vaak al iets blauwgrijs en komt er oranje roest in voor. Dieper dan 50 cm zit er veel roest in de grond en verandert de kleur van blauwgrijs naar grijsblauw. Behalve oranje roest zit er vanaf deze diepte ook meer fletse roest in het profiel. Dit wijst op een periodiek natte grond, hoewel deze laag wel poreus tot zeer poreus is en in feite dus goed waterdoorlatend is. Op ongeveer 1 m -mv, op de diepte waar de drainagebuizen liggen, is de grond blauw van kleur en slap. Wel komt op deze diepte ook oranje roest voor. Het grondwater stond na 6 uur op 1.20 m –mv. Op basis van het bovenstaande verwachten we dat het grondwater in dit perceel fluctueert tussen 50 en 1.40 m –mv (Gt VI).

In het bouwland is de grond onderin de bouwvoor vochtig en komt er wat roest in voor. Beneden de bouwvoor is de grond grauw en zit er oranje roest in, beneden 50 cm is de ondergrond nat. Ook hier veranderen de roestkleuren beneden de 50 cm: er komt voornamelijk fletse roest in voor en een beetje oranje roest. Het grondwater stond na 1 uur al op 90 cm –mv.

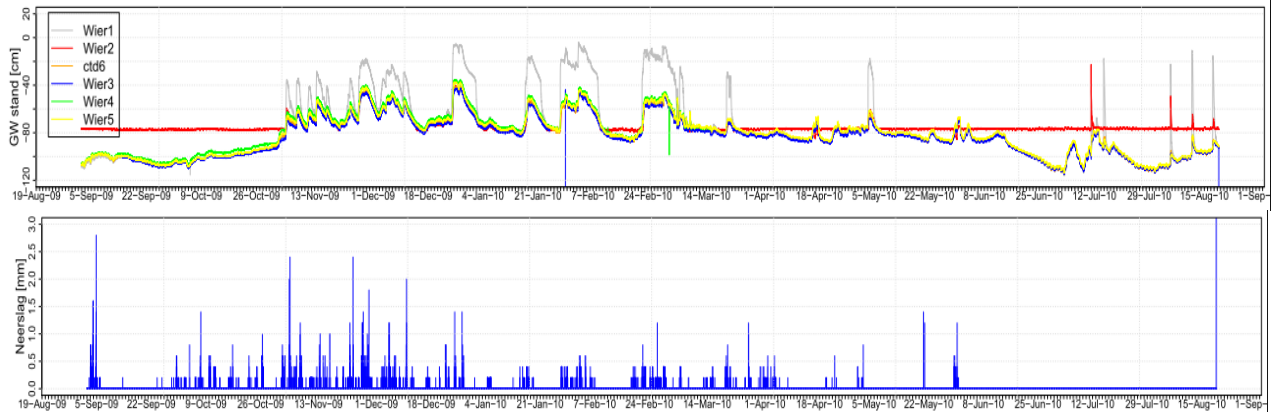
Het perceel bouwland is dus iets natter dan het grasland. De drains wijzen in dezelfde richting. In het grasland lopen van de nieuwste drains er een paar een klein beetje, maar in het bouwland lopen de nieuwste drains allemaal. Ook hangen er veel grote ijzerproppen aan de eindbuizen van het perceel bouwland. We wijten het verschil met name aan het gewas; het gras verdampt al veel en de aardappelplant moet nog beginnen. Uit de profielbeschrijvingen op beide percelen maken we op dat de drainage niet optimaal meer werkt. Ook hier is de grondwaterfluctuatie met een Gt VI te karakteriseren, maar wel iets natter als in het grasland.



Figuur 3.67. Perceel Visser met locaties van profielbeoordelingen.

Grondwaterstandverloop

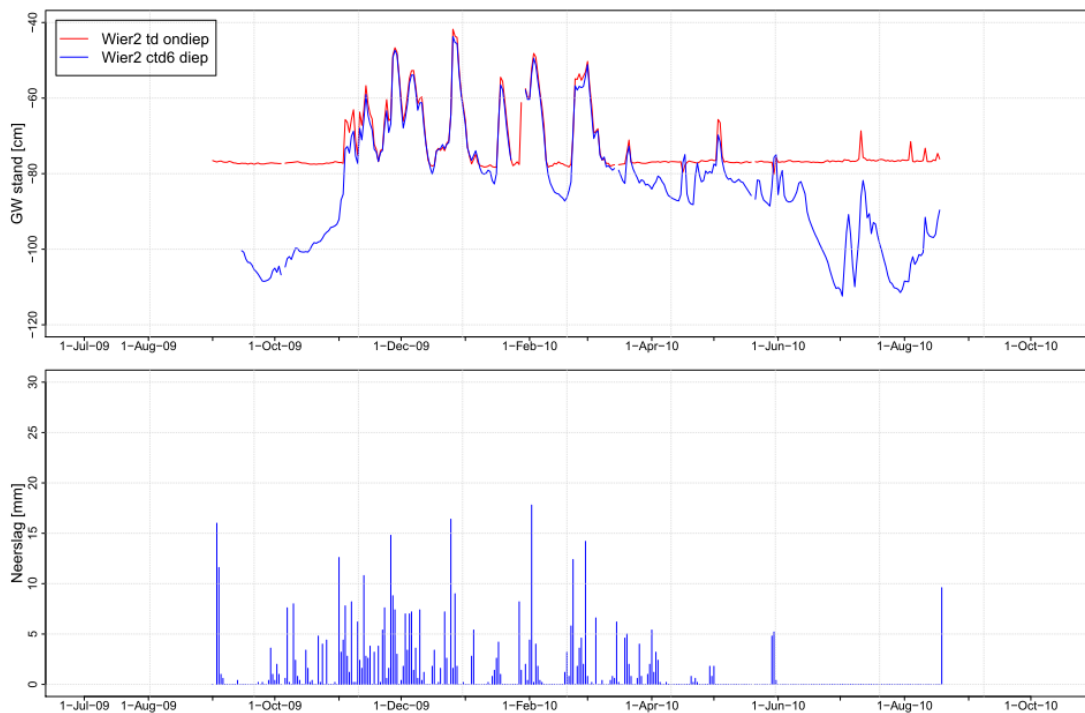
De grondwaterstand op het perceel van dhr. Visser stijgt in natte perioden tot ongeveer 40 centimeter onder het maaiveld en daalt in droge perioden tot maximaal 1.20 meter onder het maaiveld (zie Figuur 3.68 en bijlage 6a). De grondwaterstand in buis 1 stijgt tot enkele centimeters onder het maaiveld. De ondiepe buis 2 valt droog in de zomerperiode.



Figuur 3.68 Gemeten verloop van de grondwaterstand voor alle peilbuizen. Metingen weergegeven ten opzichte van maaiveld. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter.

Grondwaterstand verschil diep – ondiep

Voor het perceel van dhr. Visser geldt dat er geen opwaartse flux heeft kunnen waargenomen omdat de ondiepe buis in de zomerperiode droog viel. Gedurende natte periode waarin de ondiepe buis wel watervoerend is wordt een neerwaartse flux waargenomen. Het verschil tussen de gemeten grondwaterstanden neemt toe tot 30 cm (zie Figuur 3.69 en bijlage 6b).



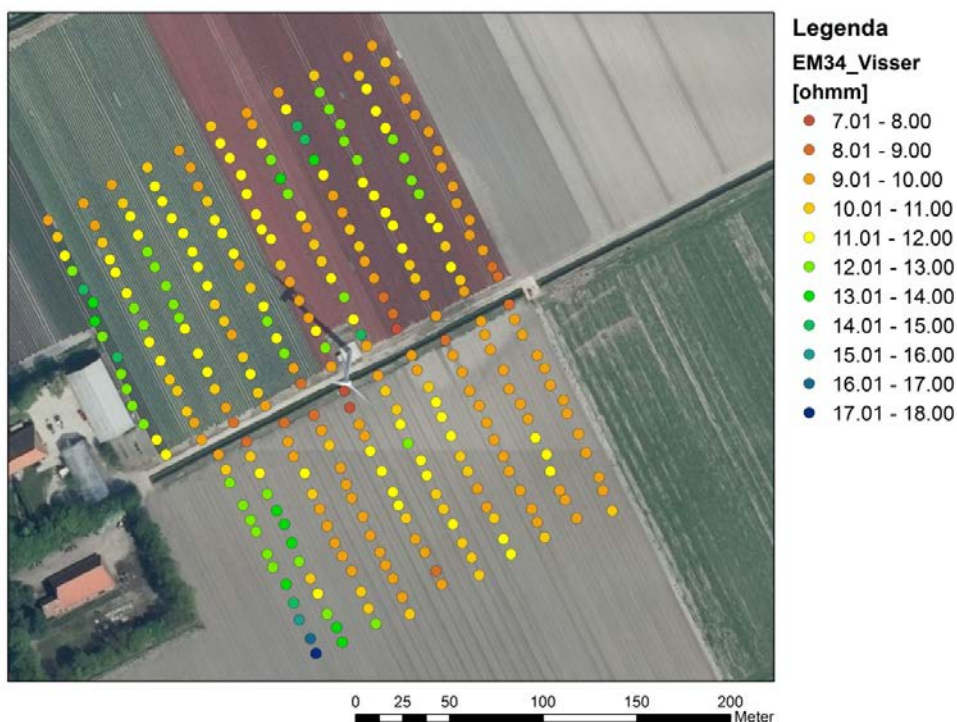
Figuur 3.69 Gemeten verloop van de grondwaterstand in het diepe en ondiepe filter voor peilbuis 2a/b. Daaronder een grafiek met het gemeten verloop van de neerslag gemeten met de regenmeter.

Opbolling van het grondwater

Plots van de grondwaterstand in de buizen op het perceel van dhr. Visser laten zien dat buis 1 wanneer de grondwaterstand boven de 70 cm beneden maaiveld komt tot bijna 40 cm hoger zit dan de andere buizen (zie bijlage 6c). Wanneer de grondwaterstand dieper dan 70 cm beneden maaiveld komt is er geen opbolling te zien. Hieruit kan worden geconcludeerd dat door de intensieve drainage is er vrijwel geen opbolling optreedt.

Geleidbaarheidsmetingen - EM34

Op het perceel van dhr. Visser is om de 10 m gemeten (Figuur 3.70). De weerstand varieert van 7 Ohm meter (Ohmm) tot 15 Ohmm met een enkele uitschieter van 17 – 18 Ohmm.

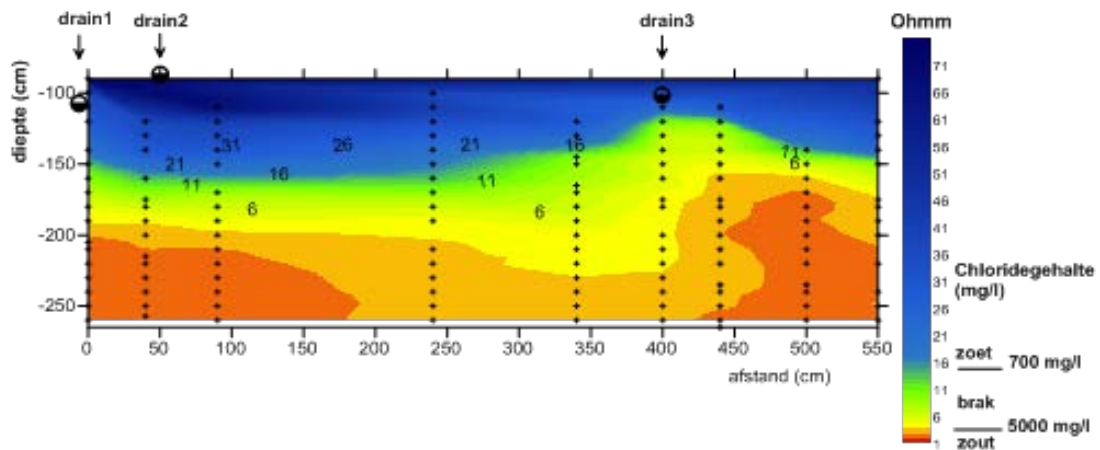


Figuur 3.70 EM34 perceel Visser, mei 2009

Geleidbaarheidsmetingen - prikstok

Op het perceel van dhr. Visser is een raai tussen drains gemaakt met een lengte van 5.5 m. Er zijn daarbij drie drains, van verschillende ouderdommen, op verschillende diepten aangetroffen. Op een afstand van -10 cm, 50 cm en 400 cm ten opzichte van meetpunt 1 op 0 cm. Figuur 3.71 geeft de meetresultaten en de locatie van de drains weer. Drain 1 en drain 3 functioneren, drain 2 is van vlak na de drooglegging en is verstopt. De lage weerstanden bij drain 3 zijn slecht tot niet zichtbaar bij drain 1 en drain 2. Tussen de drains zijn tot 1.6 m –mv waarden van rond de 24 Ohmm gemeten.

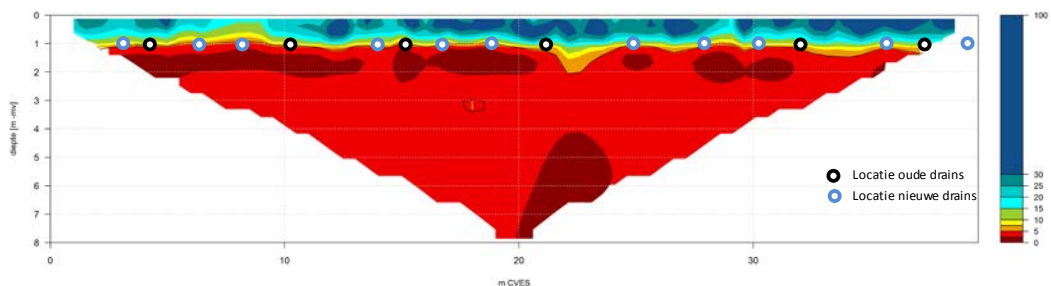
De geleidbaarheidsmetingen met de prikstok laten zien dat er een neerslaglens van maximaal 50cm dikte onder de drains aanwezig is. Ook toont de meting aan, net als bij de metingen in het perceel van Vaalburg, dat de drains het zoute water omhoogtrekken.



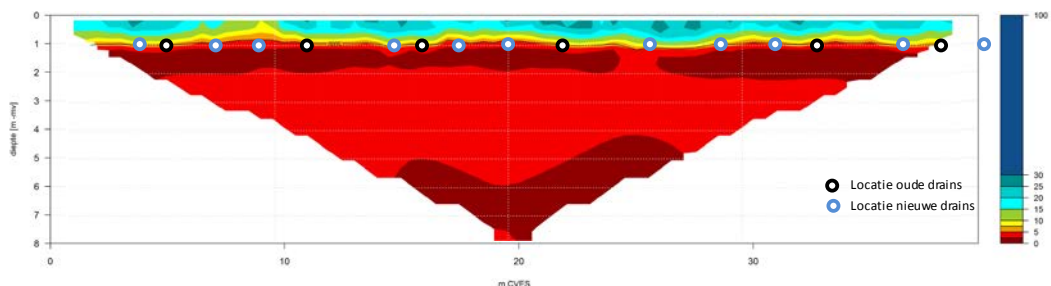
Figuur 3.71 Prikstokmeting perceel Visser, mei 2009.

Geleidbaarheidsmetingen - CVES

Op het zijn twee CVES metingen uitgevoerd dwars op de drains ter hoogte van de peilbuizen. De eerste meting is uitgevoerd in mei 2009 (Figuur 3.72), de tweede meting in oktober 2009 (Figuur 3.73). Uit de metingen van de CVES gecombineerd met de metingen van de prikstok en grondwaterstanden kunnen enkele conclusies worden getrokken. Uit de CVES metingen komt naar voren dat er zich zeer beperkt een neerslaglens kan vormen tussen de drains. Dit heeft enerzijds te maken met de snelle afvoer van het neerslagwater door de intensieve drainage, anderzijds heeft het te maken met de sterke kweldruk. Daar waar de drainafstand wat groter is lijkt zich een beperkte neerslaglens te vormen.



Figuur 3.72 CVES meting perceel Visser, mei 2009. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/l berekend met een formatiefactor van 3.



Figuur 3.73 CVES meting perceel Visser, oktober 2009. Weerstand in Ohm m. Zwarte lijn is grensvlak 2000 mg Cl/l berekend met een formatiefactor van 3.

Verder valt op dat het grensvlak van zoet en zout grondwater in de zomermaanden (representatief is de meting van oktober 2009), als gevolg van het neerslagtekort en capillaire werking, omhoog is gekomen. Dit lijkt zich af te spelen over een afstand van enkele decimeters.

Afvoer

Bij het perceel van dhr. Visser is gemeten met CTD-divers (metingen van waterhoogte en EC) bij twee meetstuwen (schot voor en -achter) (bijlage 7a) en CTD-divers in twee drains (bijlage 7b) waarmee de EC in de drains is bemeaten.

Beide meetschotten zijn begin maart 2010 uit de sloot gehaald, de daaropvolgende maanden geeft alleen de kwaliteit van het water nog een indicatie van de afvoer. Het schot voor valt eind september 2009 droog en meet daarna een waterhoogte van meer dan 2 meter. Dit is niet realistisch omdat uit veldwaarnemingen blijkt dat de sloot maximaal 1 meter diep is.

Kort samengevat heeft deze meetopstelling geen zinvolle meetseries opgeleverd waaruit voldoende betrouwbaar uitspraken over de werking van het perceel in combinatie met afvoer en zoutgehalte kan worden gedaan.

3.5 Processen die het zoutgehalte in het perceel bepalen

In deze studie zijn door de combinatie van een aantal bestaande en nieuwe meetmethodes de processen op perceelsschaal geobserveerd zoals niet eerder op dit detailniveau is gedaan. De toepassing van de CVES op de hier gebruikte hoge resolutie, een Schlumberger configuratie met een elektrode afstand van slechts 0.5m, heeft voor het eerst met een hoog detailniveau in beeld gebracht wat op een perceel de 2D verdeling van het zout water in de ondergrond is. Daarnaast hebben de continue metingen aan de kwaliteit het afvoerwater van de percelen een goed inzicht gegeven in de temporele variatie van het zoutgehalte. In combinatie met de neerslag en grondwaterstand metingen hebben we hiermee de processen die van belang zijn voor de vorming van een neerslaglens binnen een perceel kunnen identificeren en observeren. Tot slot hebben metingen zoals de EM34 inzicht gegeven in de variatie binnen een perceel en geven hiermee een indicatie hoe representatief de gedetailleerde CVES metingen zijn voor het hele perceel. Op basis van deze metingen op perceelschaal kunne een aantal conclusies worden getrokken. Achtereenvolgens worden de volgende aspecten behandeld:

- Zoutgehalte ondiepe grondwater
- Zoutgehalte bodemvocht
- Zoutgehalte en afvoer van drains

3.5.1 Zoutgehalte ondiepe grondwater

In diepe polders waar brak grondwater opkwelt, zoals de hier onderzochte Zuid-Schermer en Wieringermeer vormt zich op de percelen een dunne lens van zoet grondwater gevoed door de neerslag (Poot en Schot 2000 en Schot et al, 2004 en Van der Wal, 2001). Eén van de belangrijkste conclusies uit dit onderzoek is voor het eerst is aangetoond dat de vorm en de dynamiek van de lens wordt bepaald door de drainerende werking van greppels en buisdrains en niet door de watergangen.

De zoetwaterlens is meestal 1 tot 4 m dik. Echter direct onder de drainagemiddelen is die meestal dunner of afwezig. Als de grondwaterstanden hoog genoeg zijn en ondiep grondwater zijdelings gaat afstromen naar de buisdrains en greppels, komt ook brak grondwater vanuit de diepere lagen omhoog onder de drainagemiddelen: een effect dat bij putontrekkingen bekend is als "upconing" of "opkegeling".

Midden tussen de drainagemiddelen is de dikte van de lens dus het grootst, hoewel die kleiner is dan verwacht zou worden volgens het Badon Ghyben-Herzberg principe van licht zoet water drijvend op zwaarder brak water. Op basis van dit principe zou bij een gemiddelde grondwaterstand van 10cm boven het drainageniveau een dikte van 4m

onder het drainageniveau het resultaat moeten zijn. De reden is enerzijds dat als gevolg van de verticale hydraulische weerstand de stijghoogte op enkele meters diepte hoger is dan de freatische grondwaterstand (kweldruk). Anderzijds is het systeem zo dynamisch dat nooit de evenwichtssituatie wordt bereikt. In de winterperiode met neerslagoverschot wordt de stroming in de lenzen geactiveerd en het brakke grondwater uitgespoeld. Tijdens voorjaar en zomer dalen de grondwaterstanden tot onder de drainagebasis. In die periode stagneert de grondwaterstroming en zakken, in meer of mindere mate, ook de brakke kegels onder de drainagemiddelen in (zichtbaar in de CVES profielen op perceel Swart en Klaver). De lenzen krimpen verder door capillaire opstijging van water naar de wortelzone en gewasverdamping. De mate van groei en krimp van de zoetwaterlenzen verschilt van jaar tot jaar. Een droge winter of een lange periode met vorst, zoals in 2010, leidt tot minder aanvulling en een kleine zoetwaterlenzen. Dit was zichtbaar bij vergelijking van de CVES metingen in voorjaar 2009 en voorjaar 2010 voor perceel Swart.

Afgezien van het klimaat hangt de dikte van de lens tussen de drainagemiddelen en de mate van 'upconing' af van de volgende factoren:

- a) afstand van de drainagemiddelen,
- b) hydraulische doorlatendheid en
- c) niveau van de buisdrainage of greppelbodems (drainagebasis).

Kleine drainage-afstanden en relatief hoge doorlatendheden, zoals in het gedraineerde perceel Visser, leiden tot kleinere opbolling tussen de drains en zeer dunne lenzen van enkele decimeters. In feite vormt het niveau van de buisdrains de scheidslijn tussen zoet en brak grondwater. In het gedraineerde perceel Vaalburg kunnen zich lenzen tot een 0.7 m dikte ontwikkelen.

In de begreppelde percelen zijn de lenzen dikker. Hier doet zich de invloed van de hoogte van de drainagebasis gelden. Op de percelen Swart en Klaver zien we de elektrische weerstand van de ondergrond, gemeten met de EM34, toenemen in oostelijke richting. Die toename in elektrische weerstand is gerelateerd aan de toename van de dikte van de zoetwaterlens. Hiervoor zijn twee aan elkaar gerelateerde verklaringen te geven: Met de toenemende hoogteligging van maaiveld en drooglegging in oostelijke richting komt ook de drainagebasis van de greppels hoger te liggen. Hierdoor kan zich een grotere opbolling van de grondwaterspiegel ontwikkelen, terwijl tevens de kwelflux afneemt. Het upconingseffect bij een hoge drainagebasis is ook minder: dat blijkt vooral uit de CVES metingen op het perceel van Swart en Klaver. Het afnemen van de kwelflux kan op zich al een verklaring zijn voor de dikkere zoetwaterlens op het perceel Klaver: minder kwel leidt tot een lagere grondwaterstand en –gradiënt. Dat betekent dat voor dezelfde hoeveelheid af te voeren neerslag een dikkere zoetwaterlens nodig is.

3.5.2 Zoutgehalte van bodemvocht

Tijdens perioden van neerslagtekort en sterke gewasverdamping in voorjaar en zomer stijgt vanaf het freatische vlak door de capillaire werking water tot in de wortelzone. Tussen de drainagemiddelen stijgt dan vanaf de (dan stagnante) lenzen zoet water op. Echter ter plaatste van de drains en greppels bevindt zich soms water met hoge zoutgehalten dichtbij het freatische vlak (grondwaterspiegel). Dit zal dan ook tot in de wortelzone kunnen opstijgen. Dit effect was goed waarneembaar in het CVES profiel op perceel Vaalburg en is later bevestigd door analyses van bodemvocht.

Opstijgen van zout in de onverzadigde zone kan mogelijk effect hebben op de gewasgroei langs de drains. Het in droge periode opgebouwde verzilte bodemvocht wordt bij buien echter snel uitgespoeld. Dit is op dit perceel waargenomen als kleine zoutpiekjes van heel korte duur (enkele uren) in het drainewater.

Het waargenomen proces van bodemverzilting door opwaartse stroming vanaf het grondwater is ook waargenomen in percelen in Groningen en Friesland (van Staveren en Velstra, 2011). In dezelfde studie zijn ook modelsimulaties uitgevoerd met het rekenprogramma SWAP waarmee het optrekken van zout in de onverzadigde zone redelijk goed kon worden gereproduceerd.

3.5.3 Zoutgehalte van afvoer van drains en greppels

In het verloop van het zoutgehalte van greppels en drains, die met name voor het gedraineerde perceel Vaalburg goed is bemeten, is duidelijk de werking van de hierboven beschreven zoetwaterlenzen te herkennen. In najaar en winter wateren de percelen meestal relatief zoet water af. Echter waar 'upconing' van brak grondwater tot in de drainagemiddelen reikt, zoals bij de percelen Swart, Vaalburg en Visser, blijken de greppels en respectievelijk buisdrains ook in najaar en winter vaak water te produceren met verhoogde zoutgehaltes.

Tijdens lange droge perioden met veel verdamping krimpen de zoetwaterlensen. Wanneer daarna neerslag optreedt en de buisdrains met hun diepe ligging alweer snel gaan lopen, zoals bij perceel Vaalburg, dan heeft het water de eerste periode een hoog zoutgehalte ($EC > 10$ mS/m), omdat eerst het brakke water rond het drainagemiddel moet worden uitgespoeld. Dit kan enkele weken tot maanden duren. De meetreeks op het perceel van Vaalburg in het najaar van 2010 is helaas net te kort om dit te kunnen volgen. Een lange meetreeks uit 2010 van drainwater uit Friesland in dezelfde periode is vrijwel identiek aan die van perceel Vaalburg. Hier zien we dat het drainwater pas in oktober weer zijn zoete signatuur krijgt (van Staveren en Velstra, 2011).

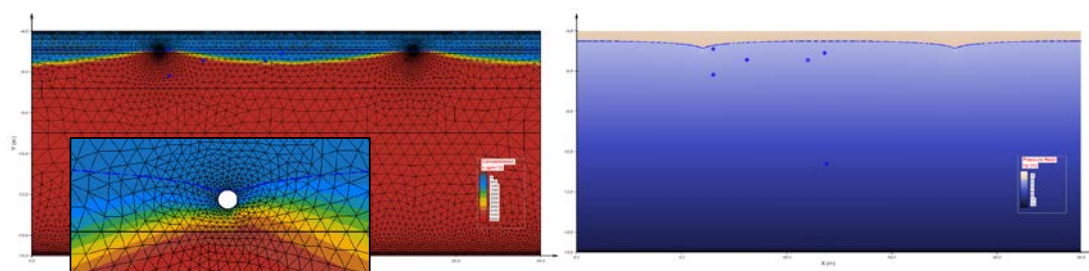
Opvallend is dat hevige zomerse buien kunnen leiden tot sterke tijdelijke dalingen in zoutgehaltes van drainwater van enkele dagen, zoals te zien in de meetreeks van perceel Vaalburg. Echter in veel gevallen is het zoutgehalte na een of twee dagen weer op het oude niveau. Dat wijst erop dat er een zeer snel reagerend stromingssysteem bestaat, gesuperponeerd op het systeem van de buisdrains. Het vermoeden bestaat dat dit systeem wordt gevormd door diepe bodemscheuren die snel maar kortstondig water aanvoeren naar de drains en zoete pieken doen ontstaan. Die bodemscheuren zijn vooral van betekenis na lange droge perioden (Vaalburg, persoonlijke communicatie). Op vergelijkbare percelen zijn in Friesland zowel afvoeren als EC's gemeten van drainafvoeren. Hieruit blijkt dat de zoete pieken samenvallen met kortstondige pieken in drainafvoeren (van Staveren en Velstra, 2011).

De kwelflux speelt ook een rol in de drainafvoeren in die zin dat bij een grote kwelflux de grondwaterstanden, zelfs na lange perioden van neerslagtekort, een opbolling blijven vertonen en drains dus blijven afvoeren. Onder die omstandigheden worden zoete lenzen in voorjaar en zomer versneld uitgespoeld.

3.5.4 Rekenen aan perceelshydrologie

Uit de metingen zijn nieuwe conceptuele ideeën en modellen ontstaan over het transport van water en opgeloste stoffen in en rond percelen in polders met brakke kwel. Om de concepten uit deze pilotstudies algemeen toepasbaar te maken, is getracht deze in mathematische modellen te vatten. Traditioneel worden hiervoor het SWAP programma voor verticale onverzadigde zone stroming (Richards equation) en ondiepe grondwaterstroming rond de drainagemiddelen (reservoirbenadering) toegepast om waterstanden, concentraties en en stofstromen te bepalen. Daarnaast zijn ook grondwaterstromingsmodellen op basis van SEAWAT gemaakt. Deze modellen zijn modellen zijn vooral gebaseerd op het perceelonderzoek in Noord Nederland, waar zich dezelfde processen afspeelen (van Staveren en Velstra, 2011). De resultaten uit deze

studie en uit Noord-Nederland laten echter zien dat de beide domeinen van onverzadigde zone en verzadigde zone niet als afzonderlijke modeldomeinen kunnen worden beschouwd. De toepassing van SWAP en SEAWAT zijn daarin beperkt. Inmiddels werken we aan een nieuwe modelbenadering, op basis van de nieuwe modelcode FlexPDE waarmee de verzadigde en onverzadigde zone als één geheel worden gesimuleerd. De toepassing ervan valt echter buiten de scope van deze rapportage. Onderstaande figuur geeft een indruk van de eerste berekeningsresultaten die van toepassing zijn op het perceel van Vaalburg. Deze nieuwe modelbenadering geeft uitzicht om autonome ontwikkelingen in klimaat en grondgebruik te voorspellen en ontwerpnormen voor velddrainage te optimaliseren. Nieuwe ontwerpnormen die rekening houden met gewenste ontwatering, sturing op vochtgehalte, ontwikkeling van de neerslaglens, verzilting en transport en afbraak van nutriënten.



Figuur 3.74. Modelbenadering op basis van FlexPDE waarbij verzadigde en onverzadigde zone volledig geïntegreerd worden gesimuleerd. Links de berekende neerslaglens tussen twee drains met het adaptieve grid. Uitgelicht is de expliciete benadering van de drain op de schaal van centimeters. Rechts de berekende waterdrukken voor grondwater (blauw) en onverzadigde zone boven de waterspiegel (bruin).

3.5.5 Betekenis van het onderzoek voor waterbeleid en landgebruik

De waterhuishouding van een perceel is sterk afhankelijk van de wijze waarop de grondgebruiker het land draineert en bewerkt. In polders met brakke kwel, veelal met een kleibodem, worden voor akkerbouw, tuinbouw en bollenteelt buisdrains toegepast. Voor grasland wordt meestal alleen greppeldrainage toegepast. Voor de akker- en tuinbouw is de situatie het meest kritisch. Een relatief diepe ligging (> 0.90 m) van buisdrains voorkomt natschade in de zomer en het najaar. Het begrenst ook het opstijgende brakke grondwater. Omdat zich meestal geen dikke zoetwaterlens ontwikkelt, kan zout in droge perioden toch door capillaire werking tot de wortelzone doordringen bij de drains. Het vergroten van de drainafstand en het verkleinen van de diepte zal de dikte van de zoetwaterlens vergroten en de grondwaterstand verhogen. Dat laatste is dan gunstig voor droge perioden, maar bij plotselinge verandering van de weersomstandigheden kan water misschien weer niet snel genoeg worden afgevoerd. Peilgestuurde drainage, die nu wordt geïntroduceerd in zandgronden in Limburg en Brabant, kan mogelijk een oplossing bieden voor polder met een kleibodem en brakke kwel. Wellicht zijn kleinere drainafstanden nodig en moeten de drains boven het ongerijpte kleiprofiel blijven (slechtdoorlatende, pyriethoudende). Diverse andere maatregelen voor het omgaan met verzilting zijn gedocumenteerd in het rapport "Inventarisatie maatregelen omtrent interne verzilting" (Velstra et.al. 2009). In dit rapport wordt ingegaan op de effectiviteit en haalbaarheid gecombineerd met de verantwoordelijke voor de uitvoering. Een recente uitwerking van maatregelen met een kosten/baten analyse in termen van wateropbrengst en financieel wordt in 2012 opgeleverd in het kader van Kennis voor Klimaat.

De waterbeheerder is gebaat bij berging van neerslag water op de percelen. Vergroten van de zoetwaterlens door verkleinen van drainagedichtheid en verhogen van de drainagebasis is gunstig. Neerslagpieken kunnen beter worden opgevangen. Metingen aan

water uit greppels (hoge drainagebasis) en drains laten zien, dat bij weinig zoetwaterberging sterkere zoutfluctuaties optreden in het afgevoerde water. Hoewel het systeem toch verzilt bij aanhoudende droogte, kan toch de inlaat worden vertraagd en verminderd.

Berging in de watergangen kan worden gerealiseerd door peilopzet in het voorjaar. Ook dat kan soelaas bieden, hoewel in totaliteit de berging gering is vergeleken bij ondergrondse berging. Peilopzet kan ook worden toegepast om de vochtvoorziening te verbeteren op de percelen ten tijd van droogte. De directe grondwatertoeinstroming vanuit de watergangen in kleigronden zal vermoedelijk gering zijn. Effectief is wel peilopzet tot boven de buisdrains, zodat water via de drains in de percelen stroomt. Iets wat nu al gebeurt in beide polders vooral ten behoeve van de bollenteelt, maar ook toegepast in kleiige gronden. Een meetproef wordt in 2012 en 2013 uitgevoerd in de Schermer onder de titel "Alternatieve vormen van duurzaam bodemgebruik en waterbeheer door en voor agrariërs" dat wordt uitgevoerd in samenwerking met SKB, LTO, HHNK en provincie NH.

Ontwateringssystemen zijn oorspronkelijk bedoeld om grondwaterstand en bodemvochtgehalte te reguleren. Voor het ontwerpen van deze systemen worden berekeningsmethoden gebruikt op basis van analytische berekeningsmethoden. Deze zijn ontwikkeld door Wageningse ingenieurs in de vorige eeuw (zie paragraaf 3.2.). Deze studie laat zien dat drainagemiddelen en waterpeilen ook de zoutgehalten in grondwater, bodemvocht en watergangen reguleren. Ook blijkt dat daar werkbare modelconcepten aan ten grondslag liggen. Het lijkt daarom zinvol voor de toekomst zoutgehalte of kwaliteitsparameters op te nemen in de ontwerpcriteria voor perceelsdrainage. Daartoe zou een systematiek kunnen worden ontwikkeld, op basis waarvan met gerichte metingen en berekeningen de drainage kan worden geoptimaliseerd voor allerlei omstandigheden zoals, bodemtype, flux en zoutgehalte van kwelwater, drooglegging en landgebruik.

Een dergelijke berekeningsmethode (mathematisch perceelsmodel) is bruikbaar voor zowel gebruiker als waterbeheerder. De laatste kan hiermee beleid onderzoeken ten aanzien van toelaatbare of gewenste ontwateringssystemen, zijn eigen peilbeheer of de effecten van autonome ontwikkelingen als klimaatverandering en bodemdaling.

4 SYSTEEMANALYSE OP POLDERSCHAAL

4.1 Watersystemen op polderschaal

De hydrologische perceels- and drainagesystemen zoals behandeld in hoofdstuk 3 maken deel uit van grotere hydrologische systemen op de schaal van polders in Laag Nederland. Anders gezegd kan men ook stellen dat de poldersystemen eigenlijk opschalingen van perceelsystemen omvatten en zelf onderdeel zijn van het grotere regionale systeem. In de poldersystemen wordt onderscheid gemaakt tussen de grondwatersystemen en oppervlaktewatersystemen. De grondwatersystemen zijn volgens de systematiek van Tóth (1963) gedefinieerd als een drie dimensionaal grondwaterlichaam dat de stroombanen omvat die ontspringen uit een bepaald hogere gelegen wegzijgingsgebied en uitmonden in een of meerdere kwel- of exfiltratiegebieden. De regionale grondwaterstromingsystemen in Laag Nederland waren voor 1000 BC, dus voor de ontwikkeling van de Jonge Duinen en de ontginning van de moeras en kweldergebieden beperkt tot het natuurlijk relief van strand- en oeverwallen en de Pleistocene stuwallen (zie ook hoofdstuk 2). In die periode bevatte de ondergrond, buiten deze hogere infiltratiegebieden al op geringe diepte brak of zout water. Die verzilting van de ondergrond in Laag Nederland had plaatsgevonden tijdens de mariene transgressie gedurende het Midden Holoceen (Post, 2004). Later zijn door de ontwatering en inpoldering peilverschillen ontstaan tussen de polders. Deze ontwikkeling en de vorming van de jonge Duinen hebben nieuwe stromingsystemen opgewekt, die op hun beurt het zoet/brak en brak/zout grensvlak hebben veranderd. Zo treedt nu wegzijging op vanuit de relatief ondiepe polders, veelal veenweidepolders, en de boezemwateren, ook al liggen die onder NAP. Daar drukt zoet water het brakke grondwater weg. Kwel overheerst in de relatief diepe polders en droogmakerijen. Brak grondwater treedt uit in de watergangen en drainagemiddelen. Langs de randen van de kwelpolders is de kwelstroom het grootst, maar daar is het opwellende grondwater vaak zoet. De reden is dat de kwel deel uitmaakt van stroombanen die ontspringen in de nabijgelegen infiltratiepolders of boezemwateren. Deze zoete stroombaan heeft het brakke grondwater verdrongen.

Het afwateringstelsel en de peilvakken in de polders hebben een rationeel geometrisch patroon, dat samenhangt met de topografie en landgebruik. De afwatering is geoptimaliseerd ten behoeve van het peilbeheer. Het zoutgehalte van de watergangen op een bepaald punt wordt bepaald door het zoutgehalte en de grootte van de kwel ter plaatse, de afstroming vanuit de perceelsystemen en de bovenstroomse aanvoer van oppervlaktewater en zoutgehalte daarvan. Buiten de gestage kwelstroom variëren de groottes en de zoutgehaltes van de laatste stromen sterk. Wanneer weinig zoet water in de droge perioden wordt afgevoerd van de percelen, nemen de zoutgehaltes toe in de watergangen. Dat kan echter weer worden onderdrukt door bovenstroomse aanvoer van zoeter water uit zoete kwelgebieden of de inlaat van zoet water van buiten de polder. Dat water wordt ingelaten om de peilen te handhaven die dalen in droge perioden door verdamping, wegzijging en waterinname door agrariërs. Echter in de hier onderzochte polders met brakke kwel wordt veel meer water ingelaten om de zout- en nutriëntengehaltes te verlagen ten behoeve van landbouwkundig watergebruik, recreatie en de natuur. Dat is het zogenaamde doorspoelen.

4.2 Doelstelling en aanpak

De doelstelling van het onderzoek is om deze saliniteitspatronen in grond en oppervlaktewater - in ruimte maar vooral in tijd - nader te onderzoeken. Dat is van praktische betekenis voor waterbeheerders. Gezien de taakstellingen om het zoetwaterverbruik terug te dringen en de KRW doelstellingen te behalen zal het waterbeheer meer gestuurd gaan worden door waterkwaliteit. Het gaat daarbij om de gehalten aan zout- en nutriënten, die verschillende bronnen hebben en langs verschillende waterstromen in het oppervlaktewater terechtkomen. Beter inzicht in de processen maakt het mogelijk om nieuwe en zelfs onvermoede oplossingen te ontwikkelen.

Voor een nader onderzoek van watersystemen op polderschaal zijn in overleg met het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier de polders de Wieringermeer en de Schermer geïdentificeerd. In beide polders heerst een kwelstroom van brak grondwater, maar de polders verschillen in leeftijd, inrichting en hydrologische omstandigheden. Voor het onderzoek zijn veldmetingen uitgevoerd om de zoutgehalten van oppervlaktewater en grondwater te bepalen. Deze en bestaande gegevens zijn gebruikt om conceptuele en uiteindelijk mathematische modellen te ontwikkelen. Aan de hand van die modellen is onderzocht hoe de watersystemen zich gedragen op verschillende tijdschalen en wat de invloed is van autonome ontwikkelingen. Er zijn geen gebiedsdekkende karteringen of watersysteemsimulaties uitgevoerd. Daarvoor ontbraken de middelen in tijd en geld. Het doel is ook niet zozeer een oplossing te bieden voor de problematiek van de gehele Schermer en de Wieringermeer. Zoals is gezegd gaat het erom de hydrologische processen in polders met brakke kwel te ontrafelen en daarmee zicht te krijgen op oplossingen in algemene zin. Het onderzoek heeft zich in de Schermer geconcentreerd op de Zuid-Schermer waar in het centrale deel de kwel sterke verzilting van grond- en oppervlaktewater tot gevolg heeft. In de Wieringermeer heeft het onderzoek zich toegespitst op de kwel en de verzoeting langs de rand in dit geval de IJsselmeerdijk.

4.3 Methoden

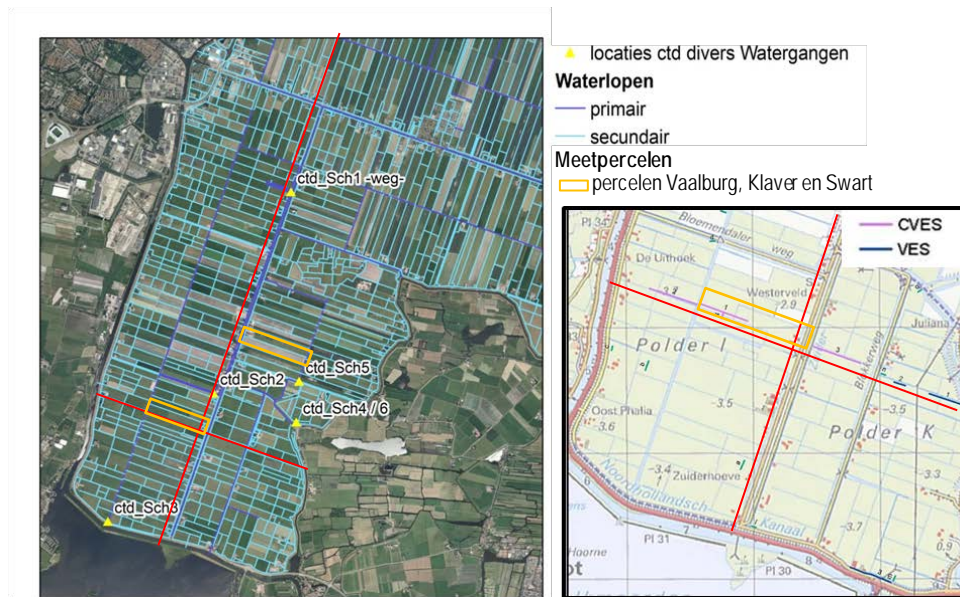
4.3.1 Handmatige EC metingen

Handmatige metingen van het elektrisch geleidingsvermogen (EC) van oppervlaktewater en water uit drains op een bepaald tijdstip zijn uitgevoerd om de ruimtelijk variatie van zoutgehalten van het water in kaart te brengen. Binnen de range van gemeten waarden bestaat een directe relatie tussen EC en het zoutgehalte uitgedrukt in chloridegehalte. Voor verdere bespreking van de methode verwijzen we naar Hoofdstuk 2. Handmatige EC metingen zijn toegepast in alle waterlopen in het zuidelijke deel van de Schermer tijdens een aaneengesloten droge periode in de zomer van 2009 zijn EC uitgevoerd Om het effect van een mogelijk verloop in de tijd te testen zijn op een aantal locaties de metingen tweemaal uitgevoerd.

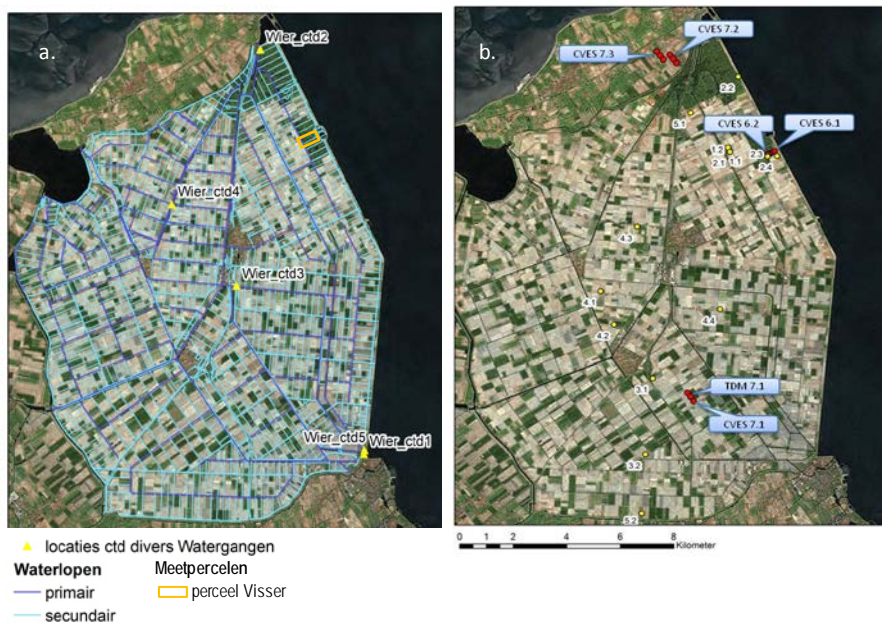
4.3.2 Continue EC metingen van oppervlakte- en drainwater

Continue EC metingen van oppervlakte- en drainwater zijn uitgevoerd met CTD divers om tijdseries te bepalen. Deze sensors meten ook temperatuur en waterdruk en slaan data op in een eigen geheugen. Voor verdere bespreking van de methode verwijzen we naar hoofdstuk 3.

In de Zuid-Schermer zijn EC's gemeten in watergangen, waaronder een locatie dat representatief is voor inlaatwater en een locatie bij het gemaal. Het verschil tussen beide locaties geeft de verandering in de concentratie weer die het gevolg is van de som van



Figuur 4.1. Locaties van de metingen in de Schermer. Links de watergangen en de locaties van de CTD-divers (hiervan is CTD-Sch1 is door onbekende oorzaak verdwenen tijdens de meetperiode) en rechts de locaties van de CVES en VES metingen. De rode lijnen geven de locatie van de profielen aan.



Figuur 4.2. Locaties van de metingen in de Wieringermeer, links de watergangen en de locaties van de CTD divers, rechts de locaties en nummers van de VES metingen (geel), CVES metingen en TDM meting (rood).

alle in paragraaf 4.1 genoemde processen. Ook zijn er watergangen aan het eind van twee deelpolders bemeten, namelijk de zuidwest Zuid-Schermer en de noordoost Zuid-Schermer (Figuur 4.1). Op een gedraineerd perceel en een begreppeld perceel zijn ook continue registraties verricht van water uit respectievelijk drains en greppels. Een gedetailleerde uitwerking van deze metingen zijn opgenomen in hoofdstuk 3.

In de Wieringermeerpolder zijn continue EC metingen verricht in watergangen bij de twee gemalen en op locaties in de polder. Drainwater is op 1 locaties bemeten, maar de serie is erg kort, omdat de apparatuur niet goed functioneerde (zie hoofdstuk 3).

4.3.3 Geofysische metingen van de ondergrond.

EM34, TDEM, VES en CVES zijn geofysische meettechnieken, die een beeld geven van de elektrische weerstand (of geleidbaarheid) van de ondergrond. Daaruit kan de EC en het zoutgehalte van het grondwater worden afgeleid. De EM34 geeft een punt meting van de "bulk" weerstand van de ondergrond en is bedoeld voor het karteren van grote gebieden. De meer tijdrovende VES en CVES metingen resulteren in een respectievelijk 1D en 2D beeld van de weerstandsopbouw van de ondergrond. Er is een TDEM uitgevoerd in de Wieringermeer. Deze geeft net als de VES een 1D weerstandsopbouw van de ondergrond. Voor een meer uitvoerige bespreking van de methode verwijzen we naar hoofdstuk 3.

In de Zuid Schermer zijn in het voorjaar van 2008 eerst ter verkenning van de ondergrond EM34 metingen uitgevoerd. Deze metingen lieten weinig variatie in het gebied zien. Het onderzoek is daarna voortgezet met VES en CVES metingen. Voor de CVES methode is een Wenner configuratie gebruikt met een elektrode afstand van 4m, die een 2D profiel oplevert over een lengte van 400m. Langs een West-Oost profiel in de Zuid-Schermer zijn 3 CVES metingen en twee VES metingen uitgevoerd. In de noord-zuid richting is een vergelijkbaar profiel gemaakt op basis van alleen VES metingen.

In mei 2009 zijn in de Wieringermeer vier CVES metingen uitgevoerd: twee metingen in het noorden van het gebied bij het voormalig eiland Wieringen en twee opeenvolgende metingen vanaf de rand van de polder aan de IJsselmeerdijk landinwaarts (Figuur 4.2). Ook is in deze polder een TDEM meting uitgevoerd gecombineerd met een CVES meting.

4.3.4 Bestaande gegevens

Verder is gebruik gemaakt van gegevens van peilen, polderbemaling en inlaat (HHNK), gegevens over landgebruik (Topvector), boorgegevens (DINOLoket), VES metingen (DINOLoket), grondwateranalyses (DINOLoket), grondwaterstanden (DINOLoket) geohydrologische stratigrafie (REGIS) en watergebruik (afgeleid uit enquêtes in hoofdstuk 5 en het landgebruik) en de neerslag en verdamping (KNMI).

4.3.5 Modelberekeningen grondwater en oppervlaktewater

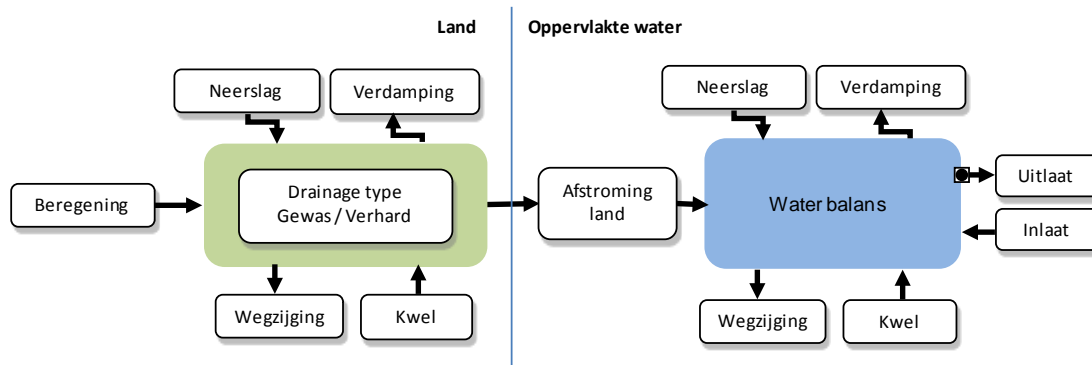
Grondwater

Simulaties voor 3D regionale niet-stationaire grondwaterstroming in de Zuid Schermer zijn uitgevoerd met het eindige differentie programma SEAWAT en zijn gebaseerd op een detail model uit een model van het gehele beheersgebied van HHNK (hoofdstuk 2). De celgrootte van model is 100 m. Alle secundaire waterlopen zijn expliciet in het model opgenomen.

Simulaties voor de 2D regionale niet-stationaire grondwaterstroming en stoftransport in de Wieringermeer, in de zoete kwelzone langs het IJsselmeer, zijn uitgevoerd met het eindige differentieprogramma SEAWAT (Buis, 2011).

Oppervlaktewater - Waterbalans

Simulatie van tijdreeksen van zoutgehalten en afvoeren van het oppervlaktewater van de Schermer zijn uitgevoerd met een voor dit project ontwikkelde waterbalans (beschrijving in Oosterwijk, 2009). De waterbalans combineert de uitkomsten van het rekenprogramma SWAP (Kroes et.al. 2008), dat afvoer van de perceels- en drainage systemen (zie ook Hoofdstuk 3) simuleert met andere in en uitgaande posten van het oppervlaktewatersysteem. Dat zijn kwel, zoals bepaald door ICW (1982), bemaling uit maalsteden van HHNK en neerslag en verdamping (direct in en uit de watergangen) van het KNMI. Inlaat vormt de sluitpost (Bijlage 9a en 9b en Velstra et al, 2010). Simulaties van water- en zoutbalansen op dagbasis voor de Zuid- en Noord-Schermer en de Wieringermeer zijn met behulp van de bovengenoemde waterbalans geïjkt en uitgevoerd.



Figuur 4.3. Schematische weergaven van de waterbalans. Links de afstroming van percelen berekend met SWAP. Rechts de posten van de waterbalans.

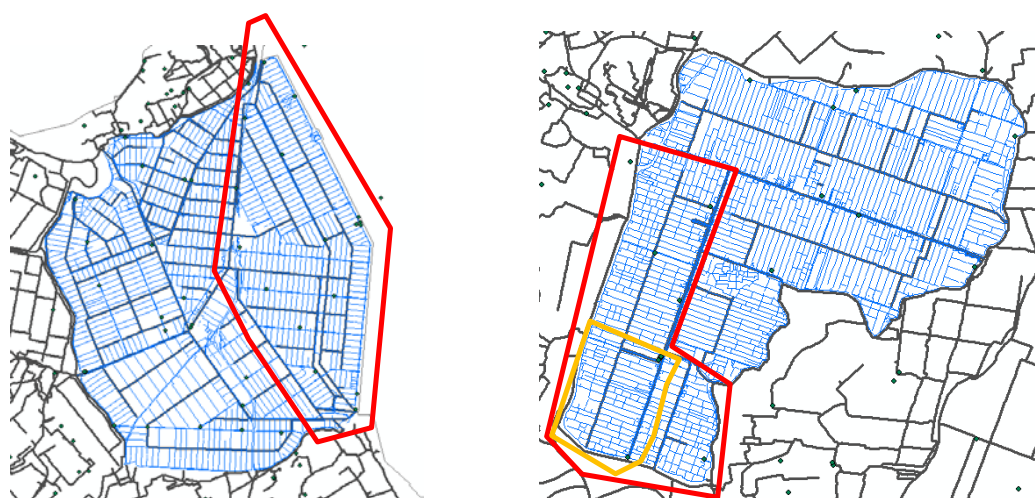
Oppervlaktewater - SOBEK

Eén van de vragen binnen het onderzoek heeft betrekking gehad op welk schaalniveau gegevens nodig zijn en op welk schaalniveau processen moeten worden gesimuleerd zodat de zoutbelasting en zoutconcentraties in een polder op gefundeerde wijze kan worden bepaald. Er zijn twee modelbenaderingen gekozen waarmee een droog (2003), gemiddeld (2005) en een nat jaar (2007) zijn doorgerekend.

Een zogenaamde eerste trap model, voor zowel de Wieringermeerpolder als de Schermer (Figuur 4.4), op basis van de primaire waterlopen en bijbehorende kunstwerken en RR module. De eerste trap is de traditionele manier om een polder in een oppervlaktewatermodel te schematiseren.

De tweede trap betreft het opzetten van een model met daarin naast de primaire waterlopen ook de secundaire en tertiaire waterlopen. Dit om de invloed van de verschillende schalen van modelleren en verziltingsprocessen op perceelsniveau in het bijzonder te kunnen simuleren. Voor de Wieringermeerpolder is uitgegaan van de afdelingen 3 en 4, voor de Schermer betreft het de Zuid-Schermer.

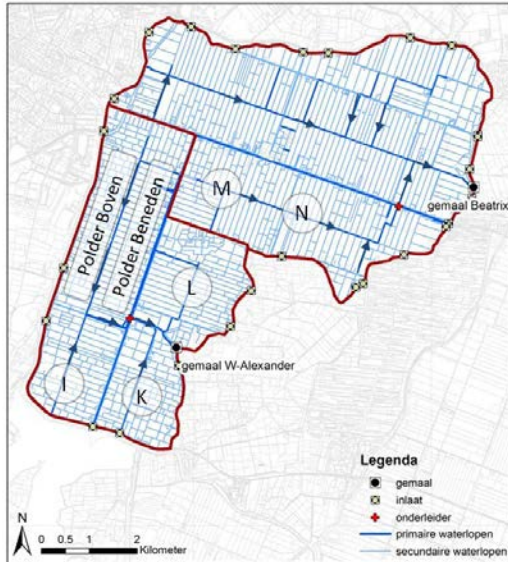
De modellen zijn in het kader van dit project gemaakt door Royal Haskoning (Royal Haskoning, 2010). Voor een deelpolder binnen de Zuid-Schermer is ten slotte een waterkwaliteitsmodel gemaakt in Sobek-WQ.



Figuur 4.4. Modelgebieden Wieringermeer (links) en Schermer (rechts). De 1^e trap model betreft de gehele polder, de 2^e trap model betreft het met rood aangegeven gebied. In de Schermer is ook een waterkwaliteitsmodel (WQ) gemaakt, aangegeven in oranje.

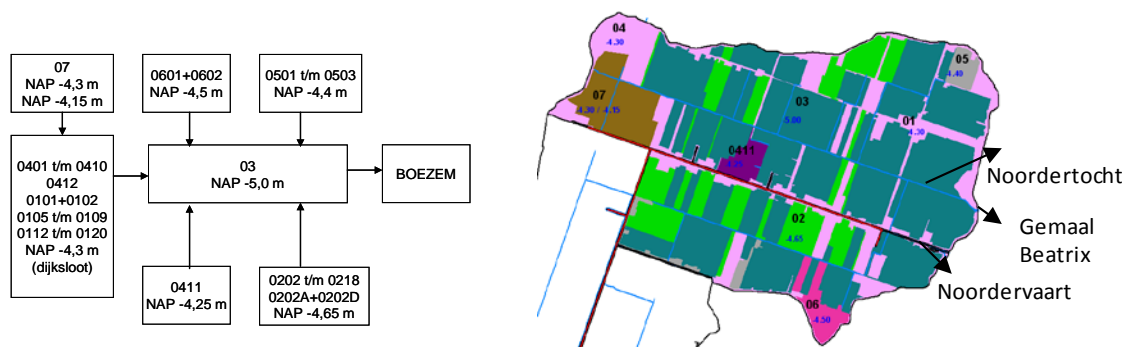
4.4 Gebiedsbeschrijving polder de Schermer

De Schermer is een polder te oosten van Alkmaar. Deze polder met een oppervlak van 6487 hectare is in 1635 drooggemaakt. In het midden van de polder bevindt zich een binnenboezem bestaande uit de Noorder- en Zuidervaart en enkele aanvullende tochten. De twee gemalen, het Beatrix en het Alexander gemaal, bevinden zich respectievelijk aan de noordoost en zuidoost kant van de polder (Figuur 4.5).

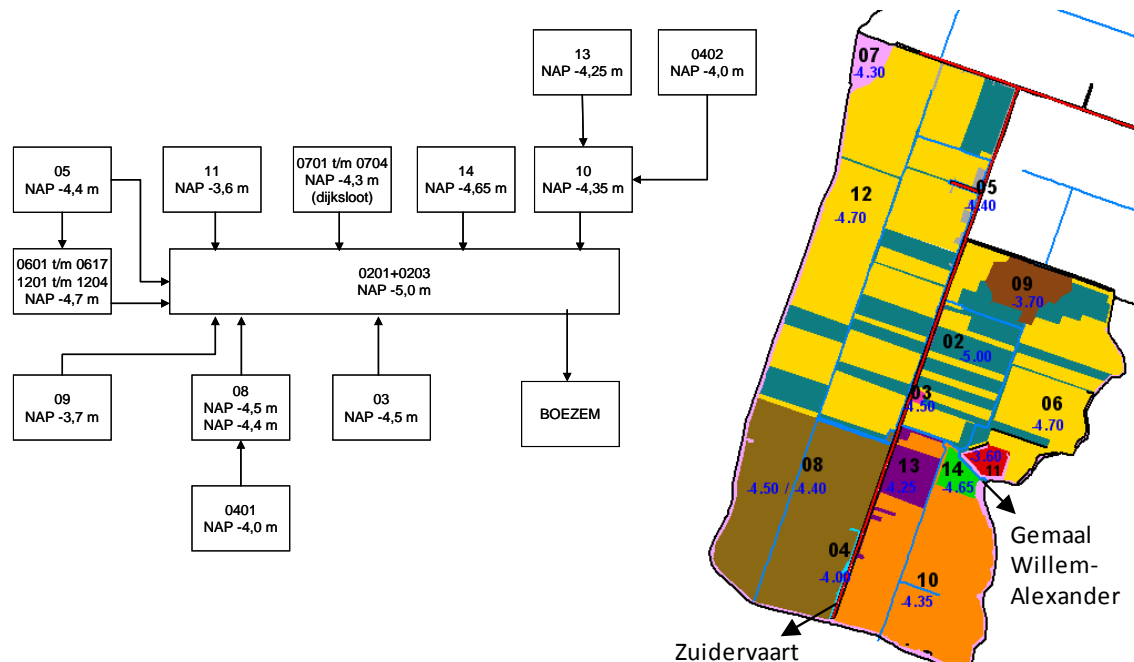


Figuur 4.5 Waterlopen Schermer (INTWIS, 2008), stromingsrichting, gemalen, inlaatpunten en poldernamen.

Vanuit de Schermerringvaart wordt water de Noordertocht en de Zuidervaart ingelaten, ook op diverse andere punten in de polder zijn (kleinere) inlaatpunten. Vanuit de Noordertocht, de Zuidervaart en de andere inlaatpunten komt het water in het deelgebiedsysteem. Vanaf dit punt zijn Schermer-Zuid en Schermer-Noord van elkaar gescheiden. Door de waterlopen stroomt het water richting de gemalen. Voor Schermer-Zuid is dit gemaal Willem-Alexander, voor Schermer-Noord is dit gemaal Beatrix. De stroming in de twee polders worden schematisch weergegeven in Figuur 4.6 en Figuur 4.7.



Figuur 4.6 Schematische weergave stroming binnen Schermer-Noord.



Figuur 4.7 Schematische weergave stroming binnen Schermer-Zuid.

Voor de inpoldering van de Schermer was het een meer, dat in open verbinding stond met de Zuiderzee. Dit meer is gevormd rond 1000 AD na afgraving van turf en het is in de loop van de tijd door golfslag uitgebreid. Het nu zoete Alkmaardermeer ten zuiden van de Schermer polder is nog een overblijfsel van het oorspronkelijk veel grotere meer.

Het landgebruik in de Schermer verschilt tussen het noorden het zuiden van de polder. In het zuiden, waar de polder zouter en natter is, zijn voornamelijk begreppelde graspercelen te vinden. In het noorden, dat zoet is, wordt akkerbouw bedreven, deze percelen worden ontwaterd door buisdrainage. In het noordwesten, tegen Alkmaar aan, is bollenteelt mogelijk op de zandgronden die daar gevonden worden.

4.5 Uitwerking en resultaten metingen polder de Schermer

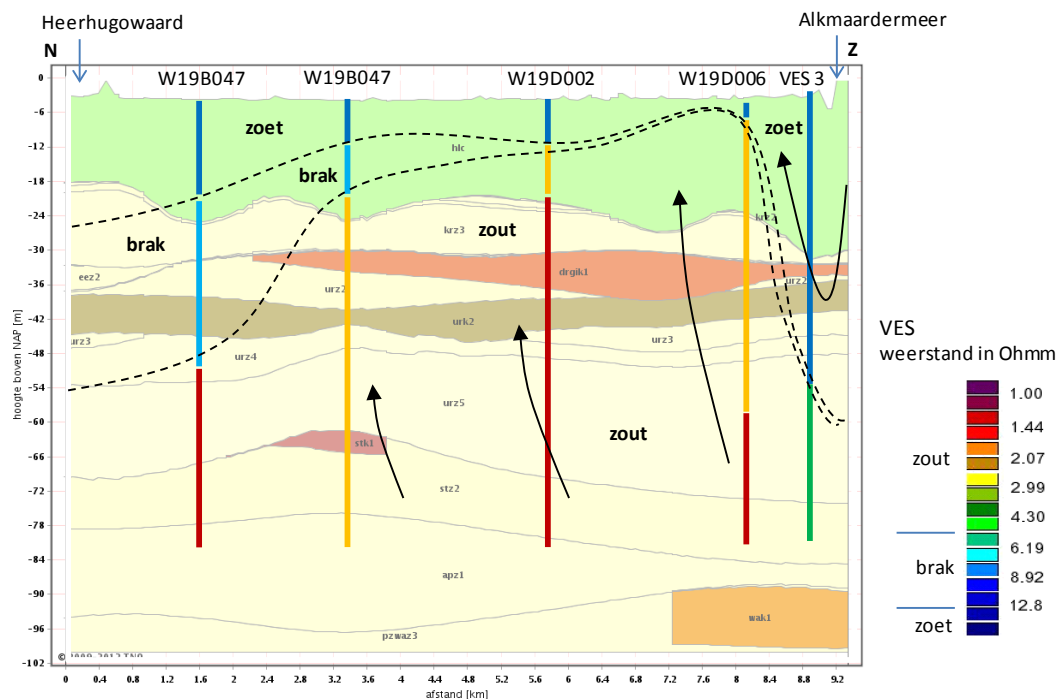
4.5.1 Geofysische metingen en geohydrologische profielen

De geofysische CVES en VES metingen van de ondergrond zijn gecombineerd met bestaande gegevens (DINOLoket) en verwerkt tot twee profielen (zie Figuur 4.1 voor de locaties). Profiel 1 loopt van noord naar zuid door de polder en omvat 4 VES metingen (Figuur 4.8). In het noordelijk deel van de polder laat een geleidelijke overgang van zoet naar zout zien met de diepte. In de VES meting W19B0041 heeft de ondergrond een weerstand van 17 Ohmm tot een diepte van ca. 20m, tot een diepte van 52m is het vervolgens 7 Ohmm om dan over te gaan in een waarde van 1.7 Ohmm. Gegeven de afwisseling van klei en fijnzand mogen we uitgaan van een geoelectrische formatiefactor van ca. 2 tot 3 (zie hoofdstuk 3). Het ondiepe grondwater heeft daar een geleidbaarheid van ongeveer 1.5 tot 2 mS/cm dat door te vertalen is naar een chloridewaarde van ongeveer 200 tot 500 mg/l. Het brakke grondwater daaronder komt op dezelfde berekeningswijze uit op ongeveer 1100 tot 1800 mg/l. Het diepe grondwater heeft een lage weerstand van 1.7 Ohmm wat overeenkomt met een chloridegehalte van ongeveer 6000 tot 9000 mg/l.

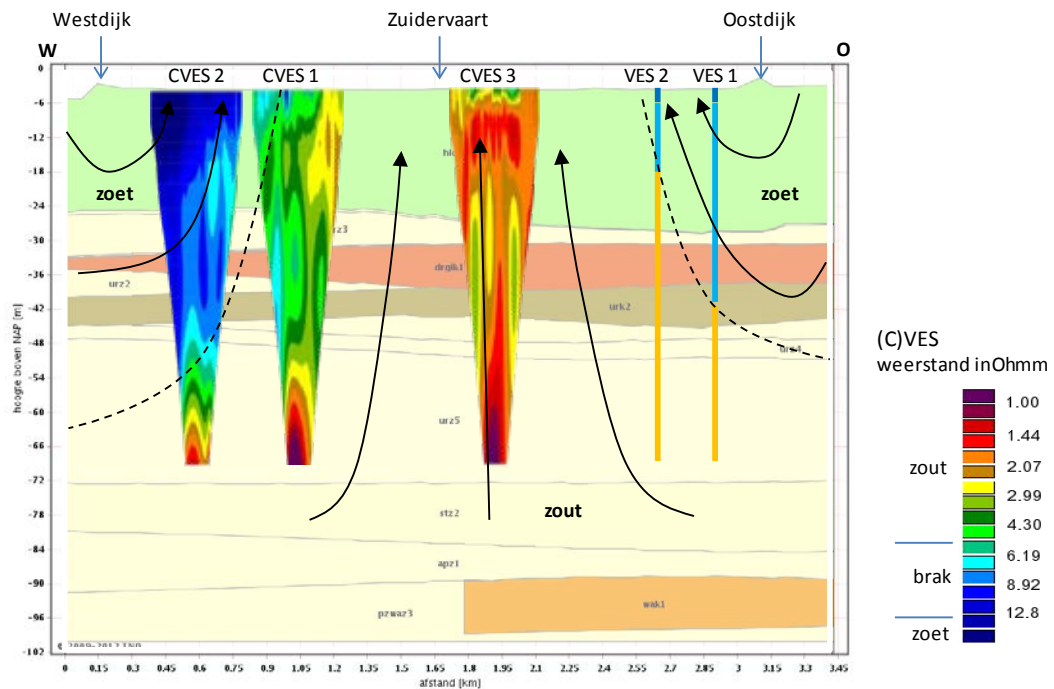
De geleidelijke overgang verdwijnt verder naar het zuiden. In de VES meting W19D0006 in de Zuid-Schermer is alleen nog sprake van een dunne laag met een weerstand van 8 Ohmm wat overeenkomt met brak water (waarschijnlijk een zoetwaterlens). Daarna

liggen de waarden op 2.2 en lager. Dit vertegenwoordigt grondwater met een chloridegehalte van ca. 4500 mg/l of hoger. Opvallend is de meting VES 3 die is uitgevoerd aan de uiterste zuidrand van de polder bij het Alkmaardermeer. Hier is het grondwater zoet tot een diepte van ca. 50m waarna het pas brak wordt.

Het tweede profiel loopt van west naar oost in de Zuid-Schermer (Figuur 4.9). CVES 2 in het westen is zoet maar geeft al een overgang te zien naar meer brakke omstandigheden. Tot die locatie op ca 500 m vanaf de westelijke dijk heeft de ondergrond tot een diepte van 40 m een weerstand van 10 tot 20 Ohmm. Uitgaande van een geoelectrische formatiefactor van ca 2 tot 3 heeft het grondwater en het kwelwater 1.5 tot 4 mS/cm, wat overeenkomt met een chloridegehalte van ongeveer 200 tot 1000 mg/l. Dat is relatief zoet en veel lager dan het brakke kwelwater in het centrale deel van de Zuid-Schermer. Bij CVES 1 zijn de weerstanden afgenomen tot de range van 3 tot 5 Ohmm. De geleidbaarheden van het hier brakke grondwater zullen navenant hoger zijn (5 tot 13 mS/cm) en zo ook de chloridegehaltes (1500 tot 4500 mg/l). In CVES3 blijkt de weerstand van de ondergrond rond 1.5 tot 2.5 Ohmm te liggen. Dat vertegenwoordigt grondwater met een geleidbaarheid van 10 tot 26 mS/m en een chloridegehalte van 4000 tot 10000 mg/l. Aan de oostzijde van het profiel neemt de weerstand van de ondergrond weer toe. In VES2 wordt weer een laag met een weerstand van 10 Ohmm, en dus relatief zoet grondwater, gevonden tot een diepte van 5 m en in de daarop volgende meting VES1 is de diepte toegenomen 30 m.



Figuur 4.8. Noord - Zuid doorsnede over de Schermer van de weerstandsverdeling in de ondergrond, tegen de achtergrond van de geohydrologische laagindeling. Metingen zijn afkomstig uit het DinoLoket met uitzondering van meting VES 3 die in deze studie is uitgevoerd. De pijlen geven de stromingsrichting van het grondwater aan.



Figuur 4.9. West - Oost doorsnede over de Schermer van de weerstandsverdeling in de ondergrond , tegen de achtergrond van de geohydrologische laagindeling. Metingen zijn uitgevoerd binnen deze studie. De pijlen geven de stromingsrichting van het grondwater aan.

De profielen illustreren de werking van het regionale grondwaterstromingssysteem. Kwel van diep brak grondwater overheerst in het centrale gedeelte van de Zuid Schermer, terwijl aan de randen zoet grondwater opkwelt uit de nabijgelegen infiltratiegebieden, namelijk de oude strandwal van Alkmaar in het westen, de veenweidepolders in het oosten en het Alkmaardermeer in het Zuiden.

Opmerkelijk is dat in het noordelijke deel van de Schermer, in tegenstelling tot de Zuid-Schermer, sprake is van een geleidelijke overgang van zoet naar zout met de diepte. Waar dus geen sprake is van brak kwelwater. De reden hiervoor is de verbreiding en dikte van de deklaag van klei en veen (zie ook hoofdstuk 2). De dikte van de deklaag is weer te verklaren met het voorkomen van de Holocene geulen en de doorlatendheid van de sedimenten waarmee deze zijn gevuld. Voor de volledigheid, de dikte van het Holoceen in de profielen komt dus niet overeen met de dikte van de deklaag, de deklaag is enkele meters dik.

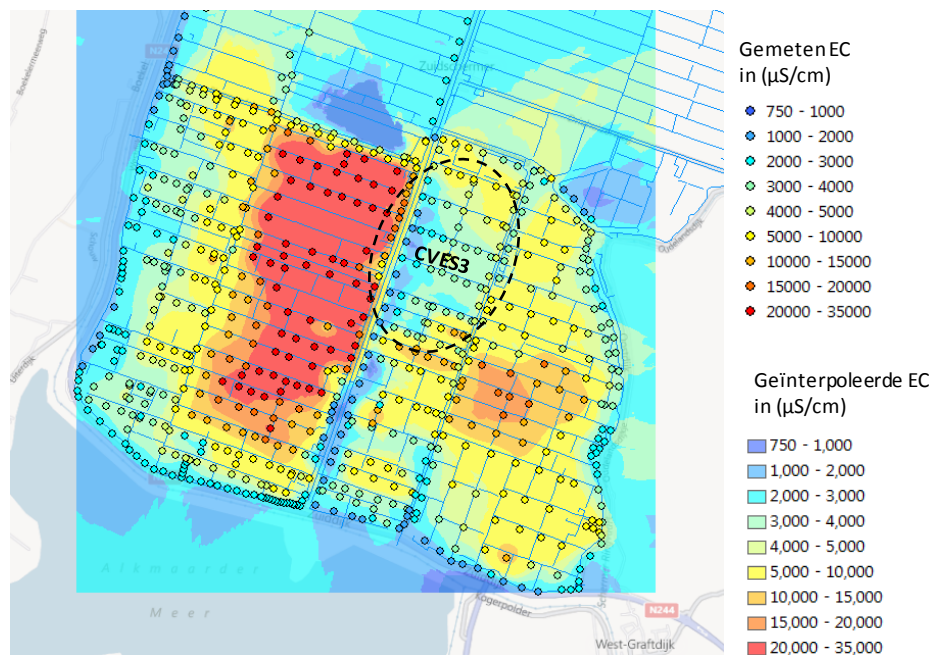
In het zuiden van de Schermer, waar de ondergrond zout is, komen geulen voor waar het basisveen is geërodeerd en waarin slechts weinig klei is afgezet. Die plekken waar de deklaag dikker is heeft er waarschijnlijk voor gezorgd dat het zoete water eronder beschermd werd. Dit is waarschijnlijk ook het geval in het noorden van de Schermer. Relevanter nu is de omgekeerde huidige situatie van kwel. Door het droogleggen in het begin van de 17^e eeuw is een niveauverschil ontstaan van ruim 2m met de omgeving en in mindere mate een stijghoogteverschil met de diepere lagen. Dit verschil zorgt voor een opwaartse kweldruk. Daar waar de deklaag dun is krijgt de kwel de kans het oppervlak te bereiken (in het zuiden) daar waar de deklaag dik is treedt dit niet of in veel mindere mate op (in het noorden).

4.5.2 Ruimtelijke variatie van zoutgehalten in het oppervlaktewater

Figuur 4.10 laat zien dat het elektrisch geleidingsvermogen van het water in de watergangen in de Zuid Schermer, gemeten in de periode april 2009, een grote variatie vertoont. De waarden lopen uiteen van ca 1 tot 20 mS/cm, wat overeen komt met chloridewaarden van ca. 200 mg/l tot ruim 8000 mg/l. Het noordelijke deel van de Zuid-Schermer is relatief zoet. In het zuidelijke centrale deel is het water sterk brak. Aan de randen komen lage EC waarden voor. Dit beeld weerspiegelt het regionale grondwaterstromingsysteem en correspondeert met de bevindingen uit de geofysische metingen. De zoete zone aan de randen houdt overigens enerzijds verband met de kwel van zoet water maar ook met de inlaat van zoet water uit de boezem.

Opvallend is het gebied ten oosten van de Zuidervaart (in Figuur 4.10 omcirkeld). Op basis van CVES3 (ook aangegeven in de figuur) en de bevindingen uit de voorgaande paragraaf moet het kwelwater ter plaatse een hoog zoutgehalte hebben. EC metingen in de greppels ter plaatse geven vergelijkbare waarden als de greppels aan de westkant van de Zuidervaart. Het blijkt dat de sloten hier, ten behoeve van veedrenking, wordt doorspoeld.

Van belang is te concluderen dat het kwelwater in het centrale deel van de Zuid-Schermer brak is. Het brakke kwelwater bereikt zowel de drains als de greppels. De EC-metingen en de geofysische metingen laten zien dat met het doorspoelen uitsluitend de waterlopen zoet worden gehouden en dit geen invloed heeft op het zoutgehalte in het perceel.



Figuur 4.10. De EC waarden zoals gemeten in het oppervlaktewater van de Zuid-Schermer in april 2009. Het omcirkelde gebied betreft een gebied dat doorspoeld wordt met zoet water.

4.5.3 Variatie in de tijd van zoutgehalten in het oppervlaktewater

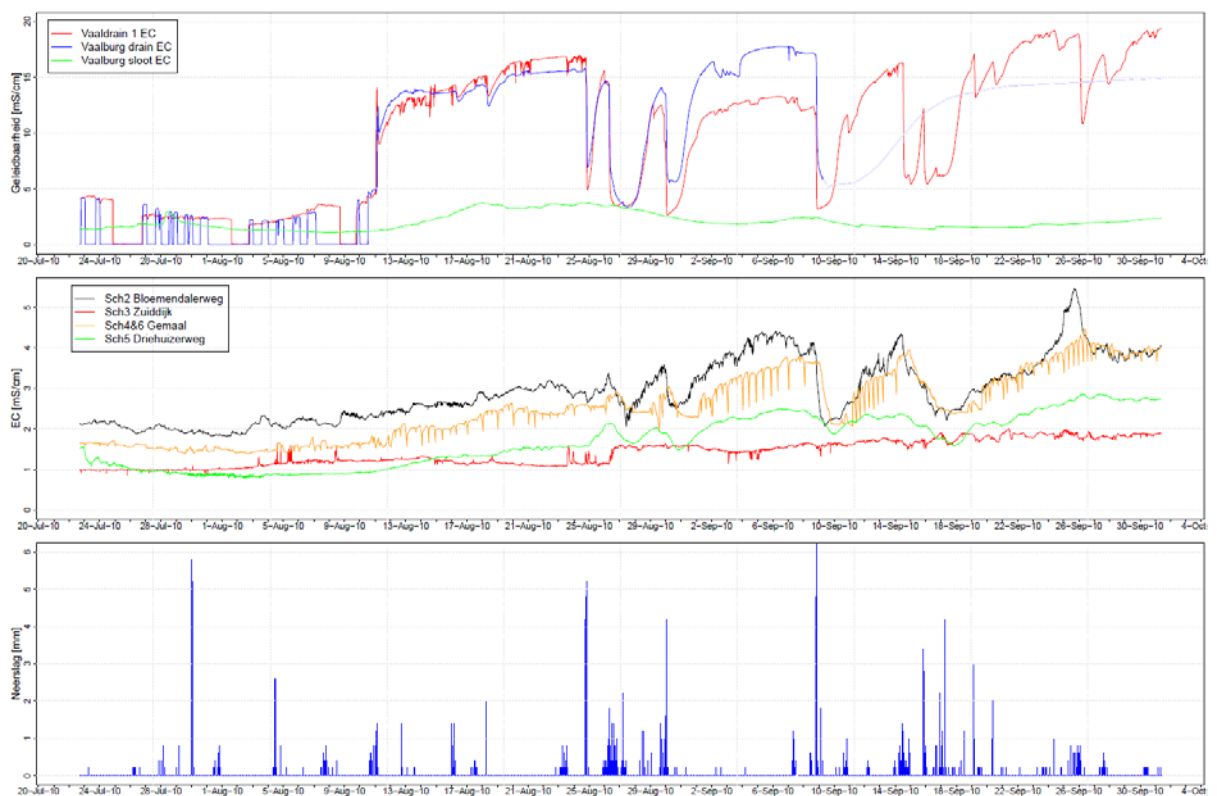
In bijlage 10 is een overzicht opgenomen van de gemeten EC waarden in de watergangen van de Zuid-Schermer, o.a. bij het gemaal, EC-waarden van het gedraineerde perceel Vaalburg als ook de gemeten grondwaterstanden van de verschillende bemeten percelen en de neerslag. De ligging van de percelen en de bespreking van de resultaten hiervan is te vinden in hoofdstuk 3. De ligging van de meetlocaties van de EC in de watergangen is opgenomen in Figuur 4.1. De in bijlage 10 opgenomen meetseries hebben betrekking op de meetperiode juli 2009 tot oktober 2010. In de beschrijving in dit hoofdstuk ligt de

nadruk op de periode juli 2010 tot oktober 2010 waarin een goede meetserie van het perceel Vaalburg tot stand is gekomen (Figuur 4.11).

De tijdreeks van EC waarnemingen in watergangen en drains van perceel Vaalburg met de CTD divers in de zomer van 2010 vertonen een variatie van 1 tot 5 mS/cm (ongeveer 100 tot 1500 mg/l chloride). De drains van perceel Vaalburg liggen in het centrale gedeelte van de polder waar een brakke kwelstroom heerst (zie voor exacte locatie hoofdstuk 3). De EC van het drainwater, dat meer de lokale omstandigheden weergeeft, variëren van 1 tot zelfs 15 mS/cm. In deze tijdreeks wordt duidelijk hoe de verschillende deelsystemen functioneren en de zoutgehalten beïnvloeden.

Bij meetpunt Sch3 in een watergang bij de zuidzijde van de polder bestaat het water in de zomer voornamelijk uit inlaatwater en kwelwater uit het Alkmaardermeer. De EC-waarde ligt in de gehele meetperiode rond de 1 mS/cm (ca. 100-200 mg/l chloride) en wordt als representatief van het inlaatwater beschouwd.

Het verloop van de EC waargenomen bij het gemaal Willem-Alexander (Sch4&6) is de optelsom van inlaat, kwel en afvoer van de percelen van de Zuid-Schermer. De gemeten EC-waarde ligt altijd hoger dan van het inlaatwater (Sch3) vanwege de kwel van brak grondwater in de watergangen. In de periode tot 10 augustus liggen die rond 1.5 mS/cm (rond de 300 mg/l chloride).



Figuur 4.11. Gemeten EC waarden in de Zuid-Schermer in de drains van perceel Vaalburg (a) en in de watergangen en het gemaal (b) en de neerslag (c) in de periode van 20 juli 2010 tot 30 september 2010. De in het middelste paneel weergegeven EC waarden in de watergangen horen bij polder I, dat een eigen peil heeft (Sch2), het inlaatwater (Sch3), afvoer uit polder L (Sch5) en het water bij het gemaal (Sch4&6).

Na 10 augustus neemt het zoutgehalte bij het gemaal toe tot waarden van 3.5 mS/m (ca. 1000 mg/l chloride), uitgezonderd de korte perioden met hevige neerslag. Rond 10 augustus is ook het moment dat de grondwaterstanden in de late zomer weer zodanig

zijn gestegen dat de veldrainage water gaan afvoeren. Figuur 4.11 laat zien dat de drains, gelegen in het perceel van Vaalburg in een deel met brakke kwel, dan ook water met hoge zoutgehaltes (15 mS/cm, komt overeen met ruim 5000 mg/l chloride) afvoeren. De reden hiervoor is dat met de afvoer van regenwater er ook 'upconing' van brak kwelwater optreedt (zie hoofdstuk 3). In het najaar wanneer het neerslagoverschot verder zal toenemen zal de drainafvoer ook weer wat zoeter worden. Dit is zichtbaar in een soortgelijke meting in een brakke polder bij Rottum in Groningen (Velstra et al., 2011).

Na relatief hevige neerslag in de late zomer neemt het zoutgehalte van het drainwater plotseling af van 15 tot 5 mS/cm om een paar dagen later weer tot het oude niveau terug te keren. Dit is kennelijk een algemeen proces omdat het ook, zij het afgevlakt, terug te vinden is in het signaal bij het gemaal.

De meetpunten Sch2 en Sch5 liggen in watergangen in twee afwateringseenheden in de Zuid-Schermer. Meetpunt Sch2 behoort bij het afwateringseenheid polder I gelegen in het zuidwesten de Zuid-Schermer. Dit is het zoutste deel van de polder blijktens de handmatige EC metingen uit 2009 (Figuur 4.10). Meetpunt Sch5 ligt in de meer noordelijk gelegen afwateringseenheid polder L waar het water veel zoeter is. Wanneer de meetserie van het gemaal beschouwd wordt en afgezet tegen de meetseries van de meetpunten Sch2 en Sch5, dan is te zien dat de trend van het gemaal beiden volgt en een resultante is van de verschillende afvoeren.

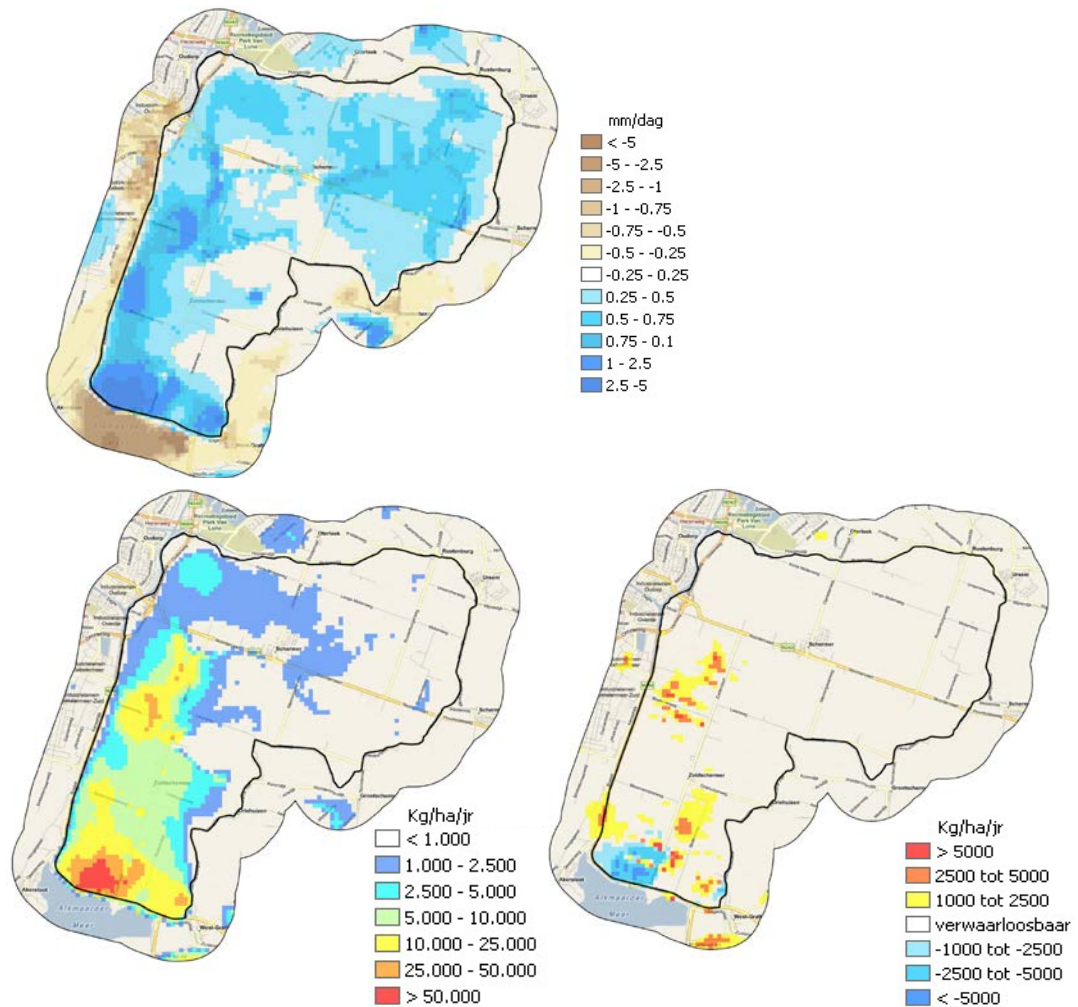
4.6 Resultaten modelsimulaties polder de Schermer

4.6.1 Huidige kwel en zoutbelasting

Voor een beschrijving van het grondwatermodel wordt verwezen naar bijlage 13. In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten besproken en vergeleken met het conceptuele model en de metingen uit de voorgaande paragrafen. Op basis van het regionale model is een detailmodel opgezet waarin in meer detail zowel de Zuid- en Noord-Schermer zijn opgenomen. Uit de berekeningen blijkt dat in bijna de gehele polder een kwelstroom bestaat variërend van 0 tot 5 mm/dag. De kwel is het sterkst in het zuidelijk deel van de Zuid-Schermer nabij het Alkmaardermeer en een zone bij de westelijke dijk op de grens tussen de Noord- en Zuid- Schermer (Figuur 4.12a). Dit houdt verband met verschillen in de dikte en hydraulische weerstand van het Holocene afdekkende pakket. Op sommige locaties is de kwelstroom vrijwel nul. Dit zijn de plaatsen waar het Holocene Basisveen aanwezig is, dat een zeer hoge hydraulische weerstand heeft. Een van deze locaties is het voormalige eiland de Matten.

Met het model zijn ook de zoutbelastingen berekend (zoutbelasting = kwelflux * zoutconcentratie). Die belasting is het grootst in dezelfde bovengenoemde gebieden (Figuur 4.12b). Echter de ruimtelijke verschillen van de zoutbelasting zijn veel meer geprononceerd. De reden is dat in de gebieden van de Zuid Schermer, waar de kwel relatief groot is, ook de zoutconcentratie van het diepe grondwater hoog zijn.

Het regionale grondwaterstromingssysteem wordt gedreven door het relatief grote en constante peilverschil tussen de diepe Schermer en de omliggende hoger gelegen polders en boezem. Om die reden is er weinig verschil tussen de kwelstroom en zoutbelasting in zomer- en winterperiode (Figuur 4.12c). Dit bevestigt het concept beschreven in hoofdstuk 3 dat alle tijdsfluctuaties van de zoutgehaltes in de watergangen alleen maar het gevolg zijn van de activiteit van de perceels- en drainagesystemen en de inlaat.



Figuur 4.12. Gesimuleerde kwel- en zoutbelasting van de Schermer in mm/dag voor de huidige situatie. (a) de kwelkaart, met in blauw de gebieden met kwellend grondwater, de geel tot bruine kleur toont infiltrerend grondwater, (b) de zoutbelastingskaart en (c) het verschil in zoutbelasting tussen de zomer en wintersituatie, waarbij rood een hogere zoutbelasting in de zomer en blauw een hogere zoutbelasting in de winter weergeeft.

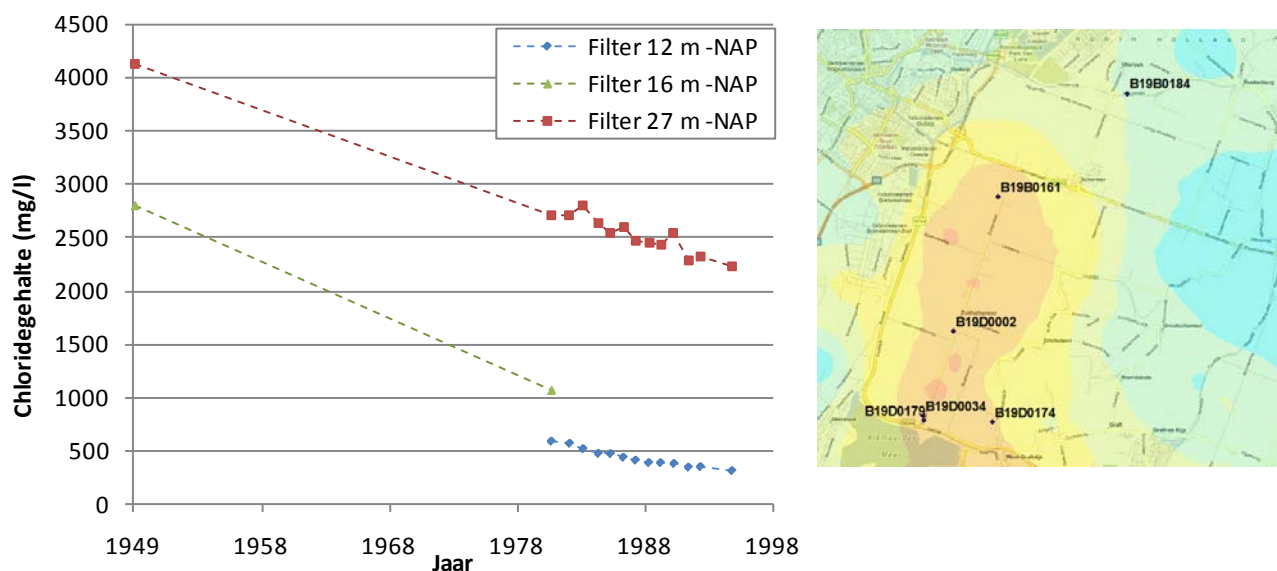
De hoge zoutbelasting in de zone bij de westelijke dijk op de grens tussen de Noord- en Zuid-Schermer komt niet duidelijk terug in het hierboven besproken EC patroon van de watergangen gemeten in 2009 (Figuur 4.11). De onzekerheid van de berekende zoutbelasting is echter groot omdat nabij deze locatie de rand van de afzetting van de Alkmaarderklei loopt. De exacte plek van de rand is niet bekend, omdat er op deze specifieke plaats geen boringen beschikbaar waren. Om deze onzekerheid te reduceren zijn extra gegevens over de ondergrond nodig. Dit wordt hier met name genoemd, omdat de bollenteelt in dit gebied kwetsbaar is voor zoutschade.

4.6.2 Verzoeting grondwater langs de zuidrand

Uit de chloride (en EC) en VES metingen en ander informatie van DinoLoket langs het noord-zuid profiel 1 (Figuur 4.8) blijkt dat het grondwater in het zuidelijk deel van de Zuid-Schermer een hoog zoutgehalte heeft. De berekende kwel, en dus ook de zoutbelasting, is erg hoog in dit gebied, zoals is gebleken uit de modelsimulaties uit de vorige paragraaf. Volgens het conceptuele model zou juist zoet kwelwater worden verwacht vanuit het hoger gelegen Alkmaardermeer en een breder gebied moeten beslaan. De polder en het huidige peilverschil is immers al 350 jaar ontstaan. Echter het

Alkmaardermeer is pas 85 geleden zoet (zie o.a. hoofdstuk 2). Alleen in de zone tot ca 100 m vanaf de dijk kwelt zoet grondwater op volgens de EC waarnemingen.

Het proces van verzoeting is echter wel gaande. Dit blijkt uit metingen in een tweetal peilbuizen in het zuidelijke deel van de Schermer (Figuur 4.13). De grafiek toont voor verschillende dieptes het verloop van het chloridegehalte. Het verloop toont duidelijk de verzoeting die optreedt als gevolg van infiltrerend water uit de boezem/Alkmaardermeer.



Figuur 4.13. Dalende chlorideconcentraties in het grondwater op de zuidelijke grens van de Schermer. Het betreft de meetpunten B19D0179 en B19D0034.

4.6.3 Effecten zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering

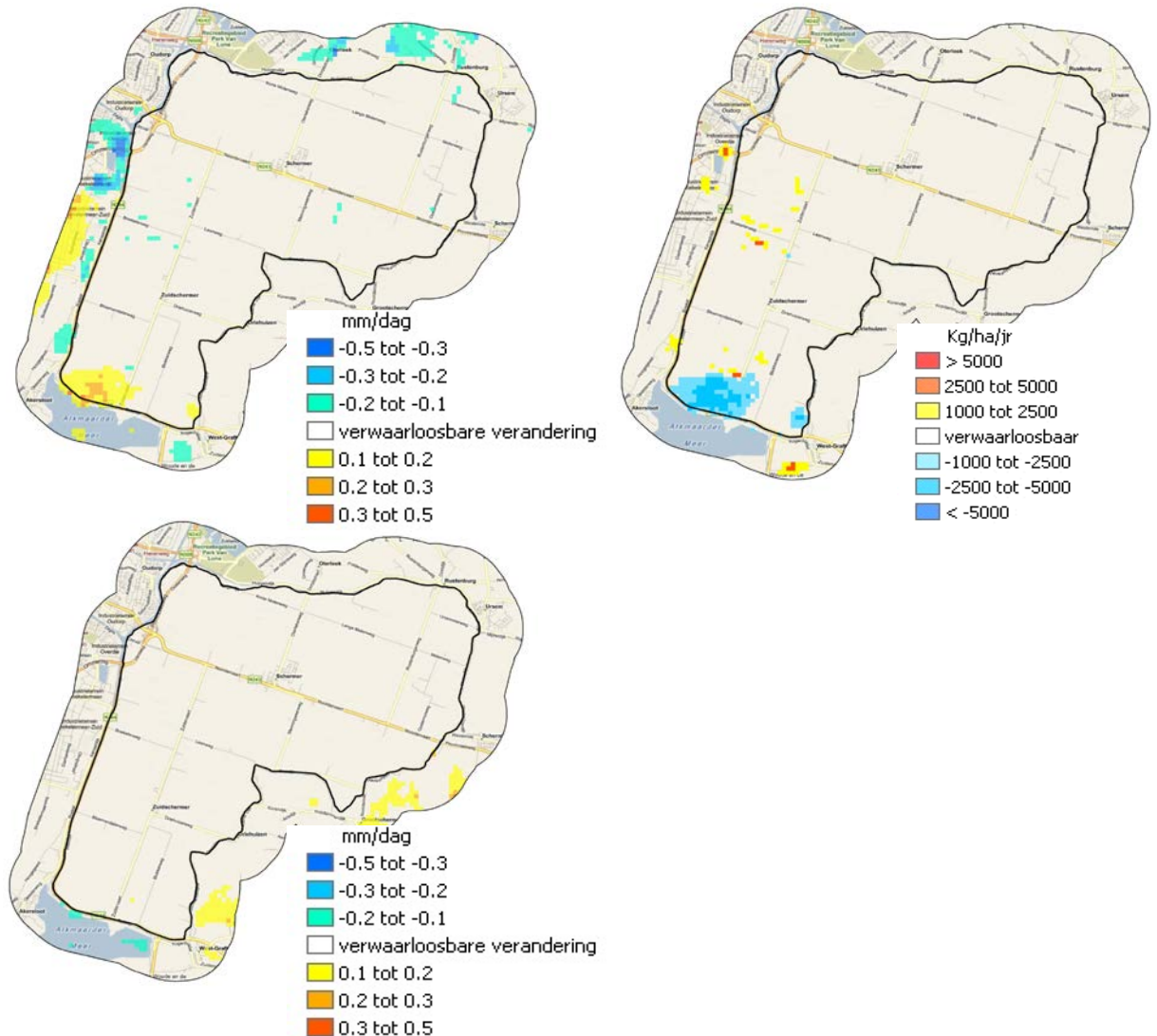
Scenario berekeningen zijn gedaan voor de voorspelde bodemdaling in 2050 en voor veranderingen in het neerslagpatroon ten gevolge van klimaatverandering. Hiervoor zijn dezelfde scenario's voor de autonome ontwikkelingen gebruikt als voor het gebiedsdekkende model, voor een uitgebreidere beschrijving hiervan wordt verwezen naar paragraaf 2.3.1.

Gevolgen van zeespiegelstijging

Net zoals voor het gebiedsdekkende model (hoofdstuk 2) zijn met het detail model een aantal scenario's met autonome toekomstige ontwikkelingen voor de Schermer doorgerekend. Met het gebiedsdekkende model is aangetoond dat de verandering in de kwel en zoutbelasting ten gevolge van zeespiegelstijging beperkt is tot ongeveer 10km vanuit de kust. In de Schermer is het effect van zeespiegelstijging dus verwaarloosbaar en deze verandering is hier verder buiten beschouwing gelaten.

Gevolgen bodemdaling

De voorspelde bodemdaling in de Schermer is relatief gering (zie figuur in H2). Dit heeft te maken met het feit dat in deze polder het grootste deel van het vroeger aanwezige veen is geërodeerd. Inklinking en compactie zullen daardoor een vrij kleine rol spelen. In de omgeving van de Schermer, met name ten zuidoosten van de Schermer in het gebied waar veel veen aanwezig is, is wel bodemdaling van 30-50cm voorspeld. Toch laten de simulaties laten zien dat veranderingen in termen van de kwel in de Schermer nabij dit gebied gering is (Figuur 4.14) Omdat de kwelflux nagenoeg gelijk blijft heeft de bodemdaling ook geen effect op de zoutbelasting van de Schermer. Kortom, in de Schermer zijn ten gevolge van bodemdaling geen problemen te verwachten.



Figuur 4.14. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting onder verschillende scenario's. (a) verandering in de kwelflux voor 2003 getransformeerd naar het KNMI W+ 2050 scenario. Een positieve verschilwaarde geeft aan dat de kwelflux is afgenomen; (b) de bijbehorende verandering in zoutbelasting. Een negatieve waarde geeft aan dat de zoutbelasting is afgenomen. (c) de gesimuleerde verandering ten gevolge van bodemdaling.

Gevolgen Klimaatverandering

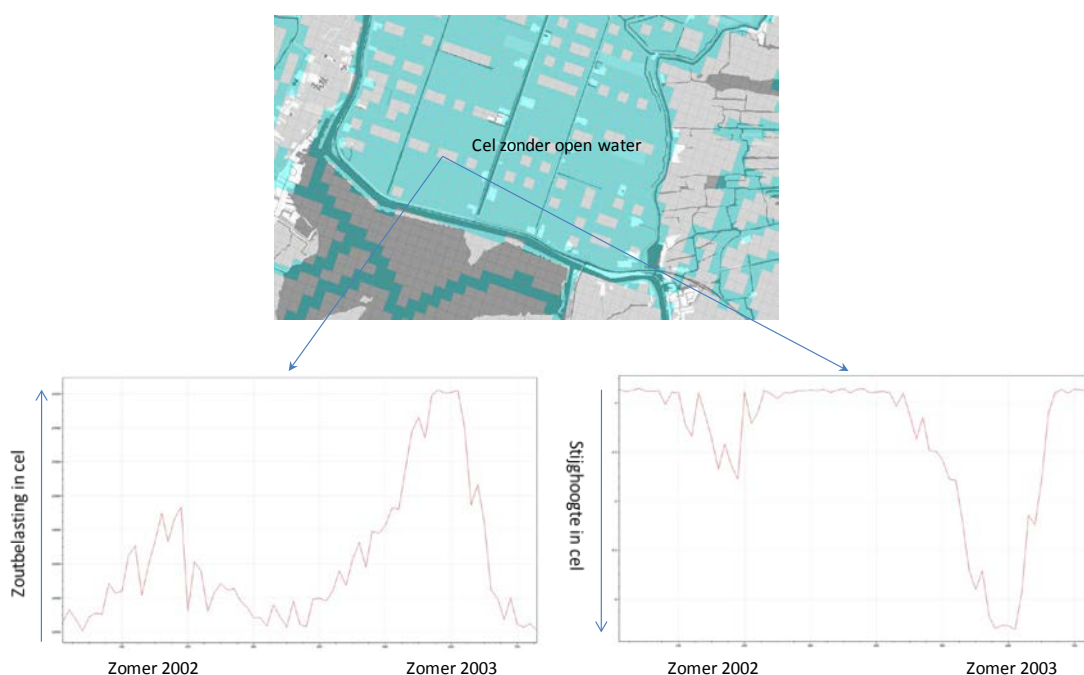
Voor de beschouwing over klimaatverandering wordt er vanuit gegaan dat de polder- en boezempeilen niet veranderen in de toekomst. De veranderingen in het klimaat hebben dan alleen betrekking op het grotere zomerse neerslagtekort volgens het KNMI scenario W+ 2050 en derhalve lagere grondwaterstanden op de percelen (H2.6). Op voorhand kan dan al worden geconcludeerd dat de regionale grondwaterstromen, inclusief de infiltratie- en kwelstromen, niet veel zullen veranderen tijdens een zomer in het huidige klimaat en die van 2050 volgens het KNMI W+ scenario. Immers tussen de Schermer en de omliggende polders blijven de verschillen tussen de peilen in de watergangen gelijk.

De grondwaterstanden op de percelen zakken in alle polders verder uit in het W+ scenario, maar doen dat in ongeveer dezelfde mate. Alleen langs de zuidrand van de Zuid-Schermer zou de kwelflux en de zoutbelasting iets groter kunnen worden. De reden is dat in het aangrenzende Alkmaardermeer overal een vast peil heerst, terwijl zomerse grondwaterstanden in het zuidelijke deel van de Zuid-Schermer gemiddeld lager zullen

zijn bij klimaatsverandering. Echter die verschillen zijn relatief gezien klein ten opzichte van de relatief grote polderpeilverschillen.

Gemiddeld gezien verandert de grondwatersituatie dus niet veel bij klimaatverandering. Wel is het zo dat droge zomers zoals die van 2003 vaker zullen voorkomen. Om die reden zijn berekeningen gemaakt met het grondwatermodel om de verschillen te bestuderen in de regionale grondwaterstromen tussen een gemiddeld jaar en een extreem droge zomer. Daarvoor zijn respectievelijk de klimaatsgegevens gebruikt van het jaar 2005 en 2003. Het jaar 2003 is bovendien getransformeerd naar het W+ scenario van 2050. De al droge zomer van 2003 is daarmee nog extremer geworden. De ruimtelijke verdeling van de berekende verandering van de kwelflux en de zoutbelasting is weergegeven in Figuur 4.14 a en b. De verschillen blijken erg klein te zijn. De grootste veranderingen treden op langs de zuidrand van de Schermer.

Opvallend is wel dat er juist een afname van de kwel en zoutbelasting wordt berekend van ca. 10 %. Die afname in de modelberekening is het gevolg van het dalen van de diepe grondwater stijghoogten. Echter in het model wordt geen recht gedaan aan het dalen van de freatische grondwaterstanden bij een droger klimaat. De celgrootte van model is namelijk ongeveer 100 m, wat ongeveer de perceelsbreedte is. Omdat verder alle secundaire waterlopen in het model zijn ingevoerd, worden de berekende grondwaterstanden vrijwel geheel bepaald door de vaste waterpeilen in de watergangen.

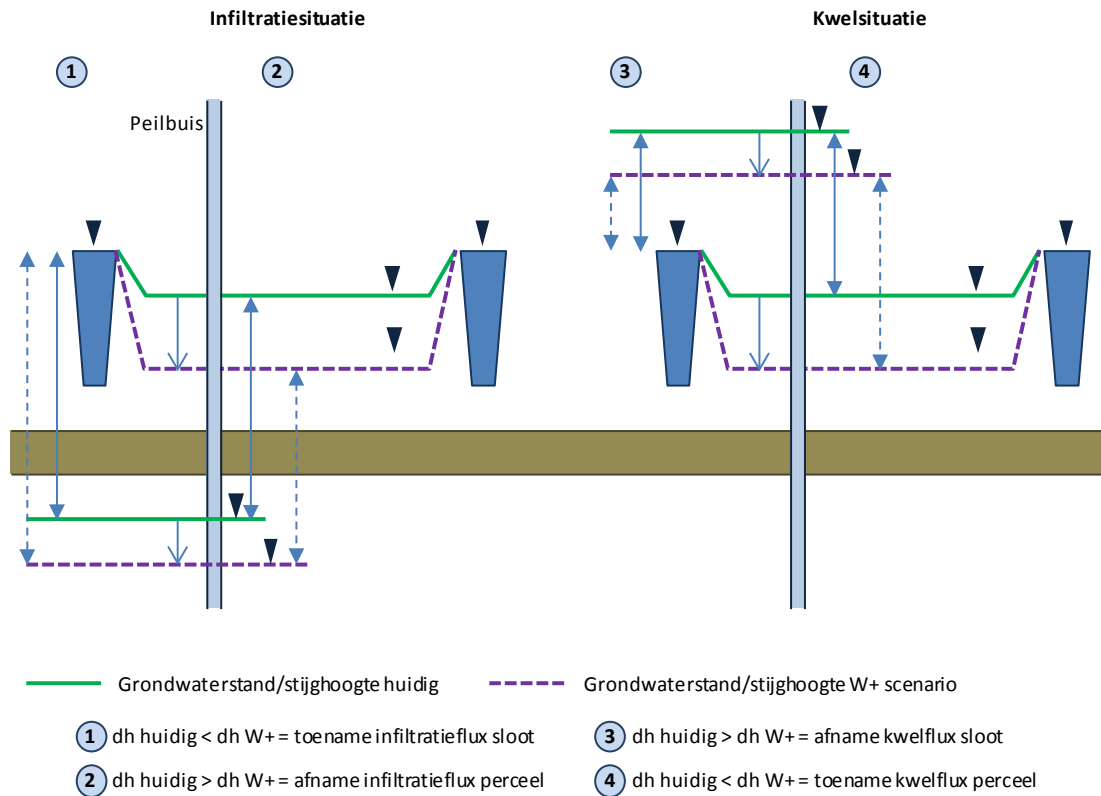


Figuur 4.15 In het bovenste paneel wordt weergegeven hoe de bedekking door de waterlopen in het model is. Door de resolutie van 100m en het expliciet oplossen van de secundaire waterlopen is in de meeste cellen open water aanwezig. In de onderste twee panelen wordt een illustratie gegeven van de dynamiek van de zoutbelasting (linksonder) en de stijghoogte (rechtsonder) in een cel zonder open water

Bij enkele cellen waarin geen waterlopen zitten blijkt de grondwaterstand wel uit te zakken en neemt de kwel juist toe.

Over het algemeen kan worden gezegd dat de zoutbelasting naar de sloot zal afnemen en de kweldruk in het perceel zal toenemen (Figuur 4.16). De toename van de kwel in het perceel zal de sloten echter veelal niet bereiken, omdat in de droge periode wanneer de grootste verandering optreedt het grondwaterniveau onder de het niveau van velddrainage ligt. Op dat moment is er nauwelijks afvoer van het water naar de sloten en

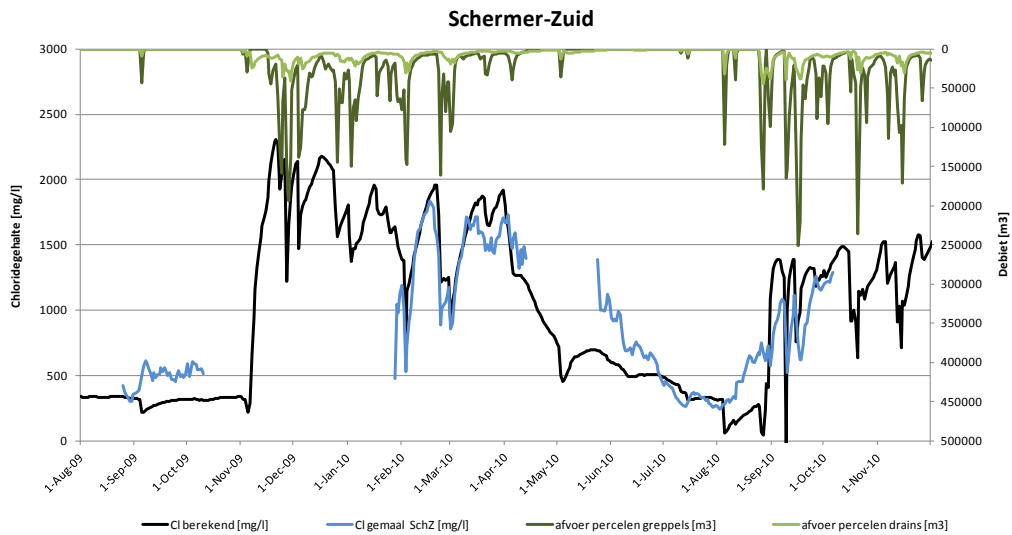
zal de extra kwel in het midden van het perceel daarom niet in het oppervlaktewater terechtkomen. De kwelflux naar de sloot toe zal afnemen, daardoor neemt ook de zoutbelasting naar de sloot af. Wanneer echter een natte periode optreedt of na de zomer het neerslagoverschot toeneemt zal echter vanuit de percelen een grotere hoeveelheid zout uitspoelen. De totale zoutbalans verandert daarmee vooral in de tijd (zie ook volgende paragraaf).



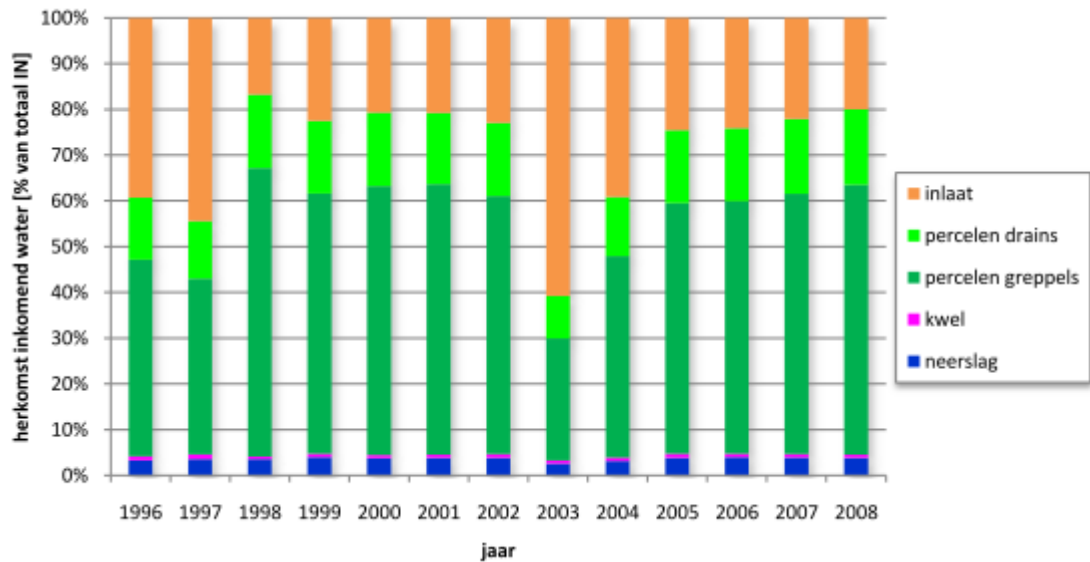
Figuur 4.16. Effect van verandering in grondwaterstand en stijghoogte door klimaatverandering op kwel en infiltratie in de zomer. Bij een infiltratiepolder zakt de grondwaterstand bij het W+ scenario verder uit. Ook de stijghoogte in het 1^e watervoerend pakket zakt weg, maar minder sterk. Als gevolg hiervan neemt in het perceel de infiltratie af en neemt de infiltratie vanuit de sloot toe. Bij een kwelpolder zoals de Schermer gebeurt hetzelfde maar omdat de stijghoogte in het 1^e watervoerend pakket boven het slootniveau ligt is het resultaat anders. Hier neemt de kweldruk onder het perceel toe en neemt de kwel in de sloot af.

4.6.4 Water- en zoutbalansen

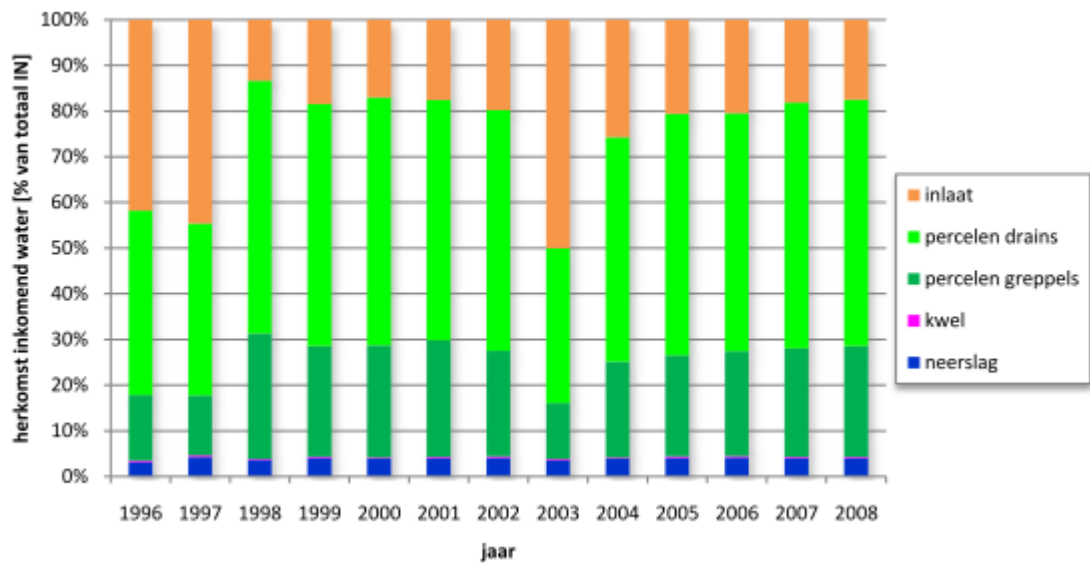
In de periode van augustus 2009 tot december 2010 is de EC gemeten van het uitgemalen water in de Schermer-Zuid. Deze metingen zijn, naast de historische meetreeksen, gebruikt voor de ijking van de waterbalans (Figuur 4.17). Uit de waterbalansberekeningen voor zowel de Zuid- en Noord-Schermer berekeningen blijkt dat de afstroming van de percelen de grootste bijdrage levert aan de hoeveelheid water in het oppervlaktewatersysteem (Figuur 4.18 en Figuur 4.19). Zowel in droge als natte jaren is de hoeveelheid neerslag en kwel direct naar de sloten toe slechts een kleine component in het oppervlaktewatersysteem. De relatieve hoeveelheid begreppelde en gedraineerde percelen wordt gereflecteerd in de hoeveelheid afspoeling. Hierdoor overheerst het aandeel van de afvoer van begreppelde percelen in de Zuid-Schermer en van gedraineerde percelen in de Noord-Schermer. Alleen in zeer droge jaren is de bijdrage van de inlaat overheersend over de afstroming van de percelen in de Schermer, vanwege het doorspoelen.



Figuur 4.17. Herkomst inkomend water in m³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor Schermer-Zuid (berekening oppervlaktewaterbalans).

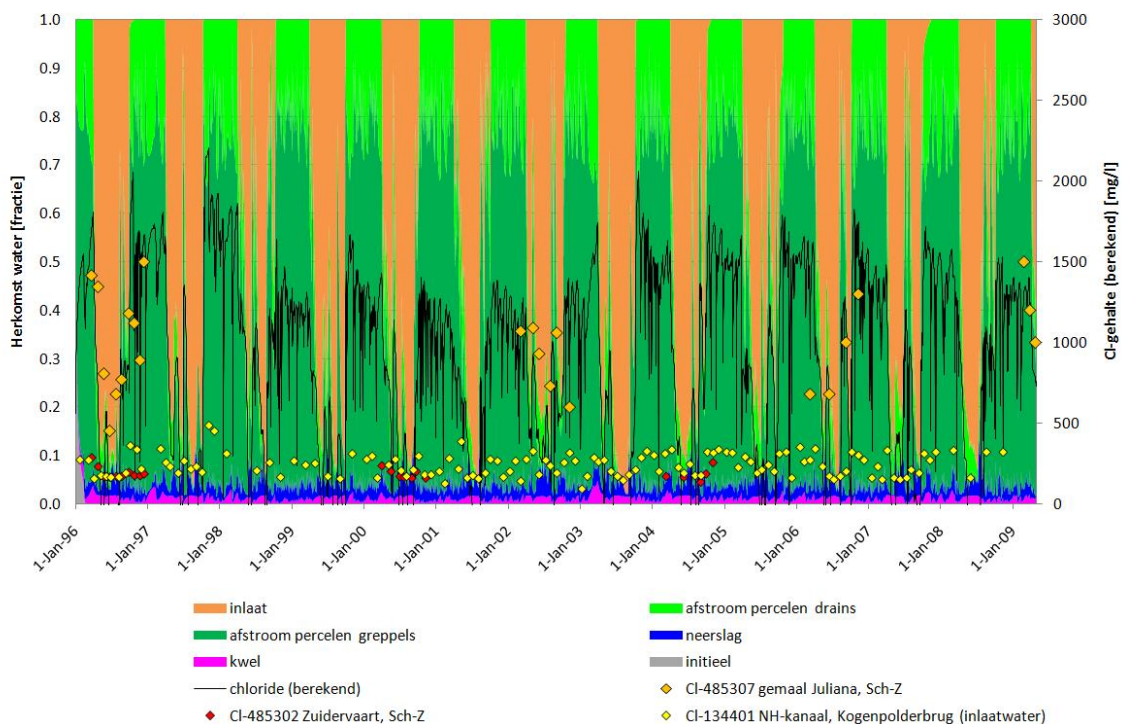


Figuur 4.18. Herkomst inkomend water in m³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor Schermer-Zuid (berekening oppervlaktewaterbalans).

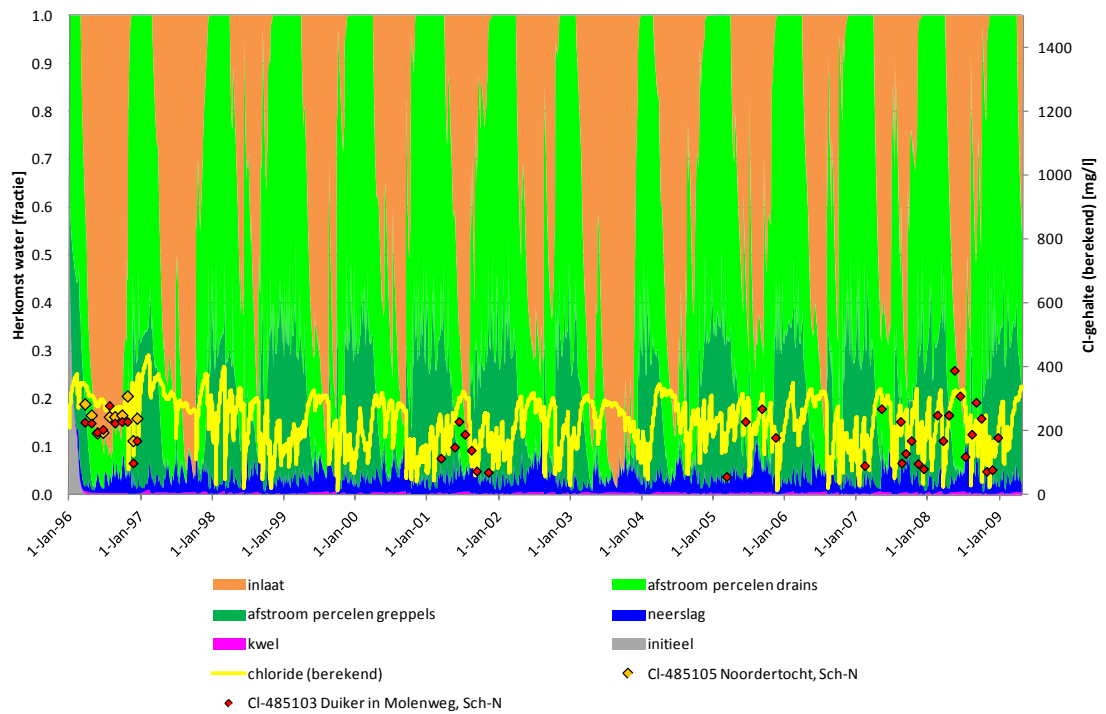


Figuur 4.19. Herkomst inkomend water in m³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor Schermer-Noord (berekening oppervlaktewaterbalans).

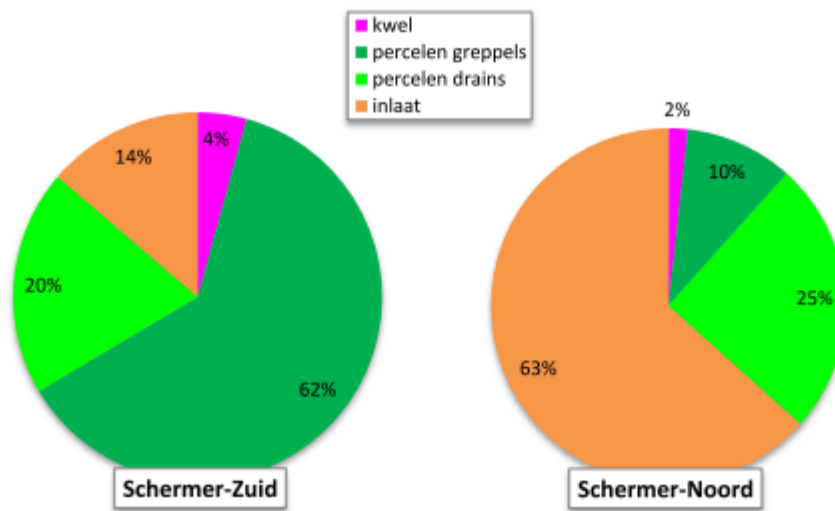
In de Zuid-Schermer zijn de processen op het perceel, zoals besproken in hoofdstuk 3, bepalend voor de chloride concentratie in de sloten. Figuur 4.20 geeft de herkomst van het oppervlaktewater weer gecombineerd met het verloop van de chlorideconcentratie. Op basis hiervan kunnen bovenstaande inzichten verder worden aangescherpt. In natte perioden overheerst de fractie 'afvoer van percelen' het oppervlaktewater in termen van watervolume en zoutvracht en is daarmee de oorzaak van de stijgende chlorideconcentraties. In de zomermaanden overheerst het inlaatwater. In een droog jaar als 2003 bestaat vrijwel al het oppervlaktewater in de polder uit inlaat water. Over de nut en noodzaak van inlaat water gaat het volgende hoofdstuk (hoofdstuk 5) dieper in.



Figuur 4.20. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in de Zuid-Schermer op basis van de waterbalans.



Figuur 4.21. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in de Noord-Schermer op basis van de waterbalans.



Figuur 4.22 Herkomst chloride in grammen als percentage van de post IN voor de Schermer in 2003 (berekening oppervlaktewaterbalans).

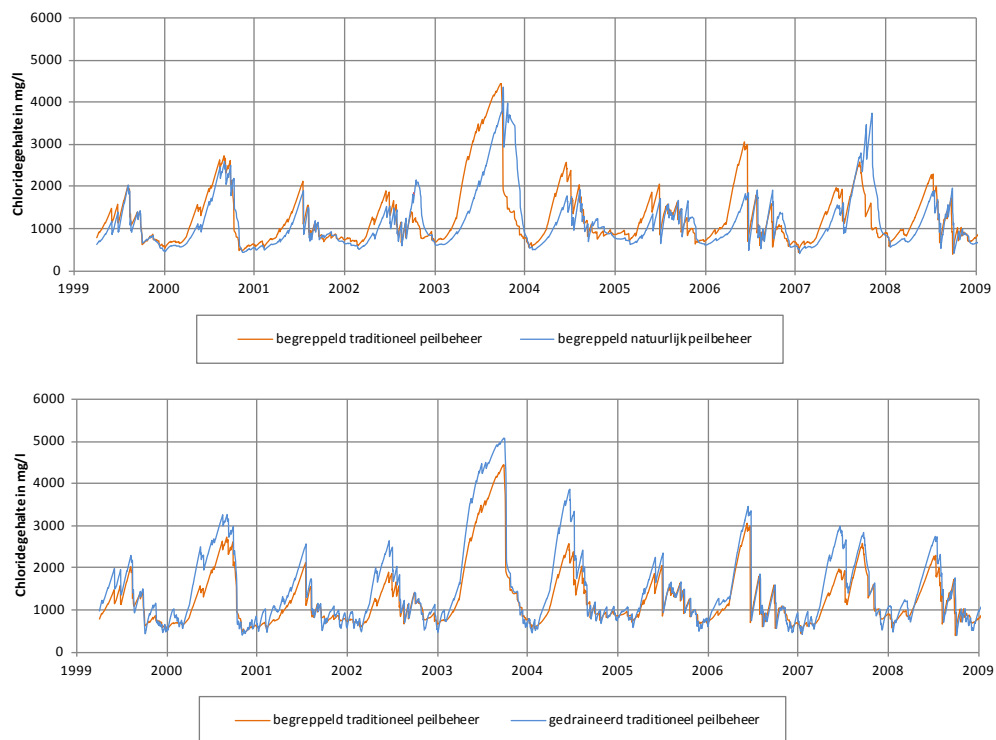
In de Noord-Schermer is minder zoute kwel aanwezig dan in de Zuid-Schermer en de Wieringermeer. Hoewel in de Noord-Schermer de afvoer van de percelen in de kwalitatieve balans de belangrijkste post was, is dit in de chloride balans niet het geval, vanwege de lage concentratie chloride in deze afstroming. In de Noord-Schermer wordt de chloride concentratie gedomineerd door de concentratie van het inlaatwater.

4.6.5 Effecten verschillende peil- en drainageregimes

Het zoutgehalte in de sloot wordt bepaald door de grondwater instroom, de drainafvoer en de bovenstroomse aanvoer. Directe neerslag en verdamping op en vanaf het slootoppervlak is van minder grote betekenis voor de zoutgehalten van de sloten. Deze verschillende fluxen bemoeilijken het duiden van de zoutgehalten gemeten in watergangen. Hieronder wordt kort het systeem van de grondwaterinstroom en de bovenstroomse aanvoer besproken.

De grondwaterinstroom naar de watergangen wordt bepaald door de hydraulische doorlatenheden, de freatische grondwaterstanden op het perceel (zijdelingse grondwaterafstroming) en de stijghoogten in het onderliggende watervoerende pakket (diepe kwel). Onder gedraineerde percelen stijgt de freatische grondwaterstand in het winterhalfjaar niet verder dan enkele tientallen centimeters boven het drainageniveau (drains en greppels). De zijdelingse afstroming is, zoals de metingen aantonen, zeer beperkt. Na droge perioden in de zomerperiode zal bij lage grondwaterstanden de zijdelingse afstroming zeer gering zijn. De zijdelingse afstroming bestaat voornamelijk uit zoet grondwater, hoewel net als bij de drains na een lange droge periode de zoutgehalten van het instromende grondwater de eerste paar maanden relatief hoog zullen zijn: eerst moet het zoute grondwater, dat de plaats van de gekrompen zoetwaterlenzen heeft ingenomen, moeten worden uitgespoeld. De metingen tonen aan dat de invloed van de sloot veelal beperkt is tot de eerste greppel. De zijwaartse instroom uit het perceel zal daarom ook beperkt zijn tot enkele meters.

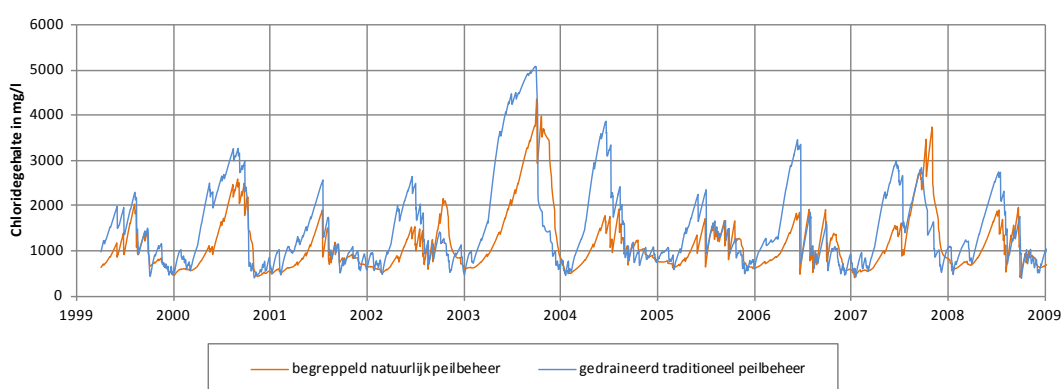
De diepe kwelflux in de sloot bestaat uit brak water. Eigenlijk is dit equivalent aan de 'upconing', die wordt aangetroffen bij de drainagemiddelen, met het verschil dat dit een permanente instroom van brak water betreft. (Dat houdt in dat een deel van de brakke kwel via de drainagemiddelen in de sloot terechtkomt, zoals hierboven is samengevat.)



Figuur 4.23. Berekeningsresultaat van chlorideafvoer uit gedraineerde en begreppelde percelen bij traditioneel en natuurlijk peilbeheer.

De bovenstroomse aanvoer van ander type water maskeert de zoutgehalten van de grondwaterinstroom op een bepaalde plaats. Dat is vooral evident bij het inlaten van water gedurende voorjaar en zomer, zoals blijkt uit de meetreeks van de watergang langs het perceel Vaalburg.

De watergangen, die niet door inlaat zijn beïnvloed, laten een wat meer afgevlakt verloop zien van zoutgehalten dan alleen van de drains. Dat wordt veroorzaakt door de verschillende interfererende bijdragen uit de ondergrond en de drainagemiddelen. In de hier onderzochte brakke kwelgebieden zien we relatief lage zoutgehalten in de winter. In de daarop volgende droge perioden in voorjaar en zomer lopen de zoutgehalten op en benaderen die de zoutgehalten van het diepe grondwater. Dat duidt erop dat de zijdelingse grondwaterinstroom en de drainafvoer van zoet water is gestopt en de diepe kwel dominant is. Na de komst van regenrijke perioden in augustus daalt het zoutgehalte weer. Zoals er een naijlingseffect bestaat in de zoutgehalten rond de drainagemiddelen is die er ook in de zoutgehalten van de sloten.



Figuur 4.24. Gecombineerd berekeningsresultaat chlorideafvoer uit begreppeld perceel met natuurlijk peilbeheer en gedraineerd perceel met traditioneel peilbeheer.

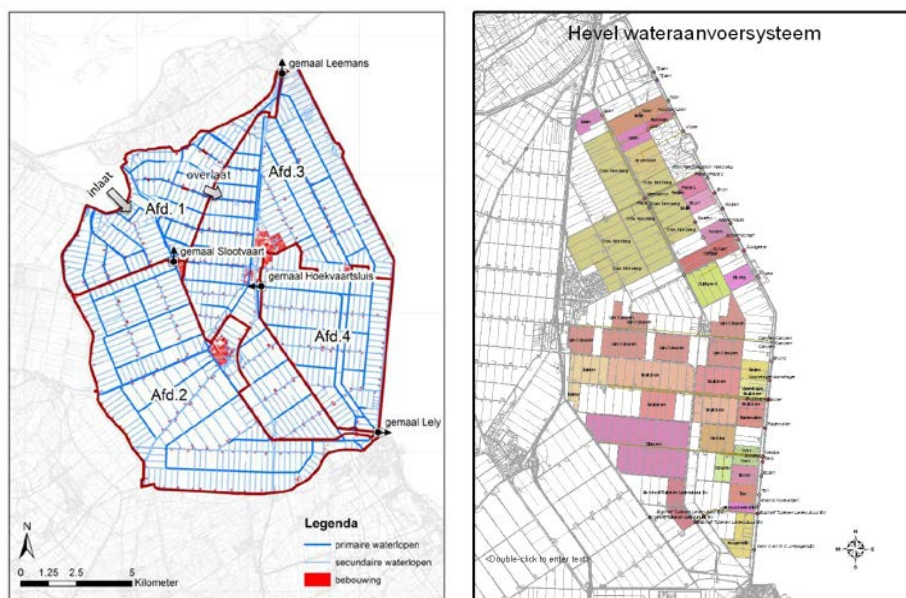
Zoals gezegd is het zoutgehalte in een watergang van een brakke kwelpolder de resultante van verschillende processen en systemen. Er zijn daarom modelberekeningen uitgevoerd (zie Figuur 4.23 en bijlage 9, publicatie H2O Velstra et.al. 2010) om de invloed van de verschillende hierboven beschreven processen te onderzoeken. Naar verwachting blijkt dat het vergroten van het bergend vermogen van de zoetwaterlensen, de stijging van de zoutgehalten van drains en watergangen in droge perioden in het voorjaar doet vertragen of verlagen. Dit kan worden bereikt door wijzigen van peilbeheer van traditioneel (zomer hoog en winter laag peil) naar een natuurlijk peilbeheer (winter hoog en zomer laag). De berekening laat zien dat hiermee de verzilting van het oppervlaktewater met orde 6 weken kan worden uitgesteld. Een andere wijziging, namelijk het verhogen van de drainagebasis van 90cm tot 30cm onder maaiveld (van gedraineerd naar begreppeld), resulteert in het later op gang komen van de verzilting met een lagere concentratie. Beide ingrepen hebben echter wel als consequentie dat hogere grondwaterstanden optreden in natter perioden.

4.7 Gebiedsbeschrijving Wieringermeerpolder

De Wieringermeerpolder ligt in het noordoosten van Noord-Holland en heeft een oppervlak van 19.840 hectare. De polder is in 1930 drooggemaakt en vanaf 1934 in cultuur genomen. De Wieringermeer is verdeeld in vier afdelingen van verschillende grootte (Figuur 4.25). Ten behoeve van het peilbeheer is geen wateraanvoer nodig vanwege de grote hoeveelheden (brakke) kwelwater. Voor de teeltmogelijkheden wordt plaatselijk water aangevoerd vanuit de Amstelmeerboezem. De afvoer van het polder vindt plaats via twee gemalen Leemans en Lely. De hoofdafvoer van de polder is in noordelijke richting direct naar de Waddenzee via gemaal Leemans.

Naast de normale inlaat vindt aanvoer plaats via hevels over de IJsselmeerdijk. Deze hevels bedienen het gebied in de afdelingen 3 en 4. Volgens HHNK wordt de totale instroom vanuit de hevels geschat op ca. 1 miljoen m³/jaar. De meeste schattingen zijn echter hoger, met waarden tot 6 miljoen m³/jaar. Volgens opgave van enkele boeren is de hoeveelheid die door de hevel stroomt 60-70 m³/uur waarbij veelal gebruik wordt gemaakt van een pomp.

Het landgebruik van de afdelingen 1 en 2 is overwegend akkerbouw maar kent ook bollenteelt in het noordwesten. Het veel zoutere deel van de polder, afdeling 3 en 4, kenmerkt zich ook door overwegend akkerbouw. In het oppervlaktewater worden chloridegehalten gemeten van boven de 1.000 mg/l. In het gebied is ook een aantal natuurgebieden te vinden (o.a. Robbenoordbos en Dijkgatbos).

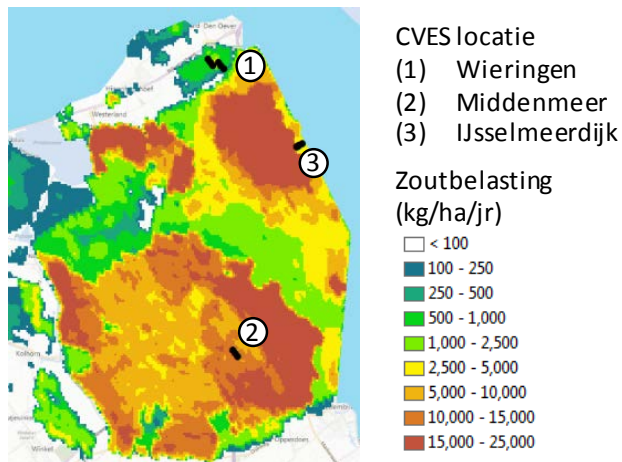


Figuur 4.25 Links: Waterlopen en bebouwing Wieringermeer (INTWIS, 2008), gemalen en inlaat. Rechts: Hevel wateraanvoersysteem dat plaatsvindt in afdelingen 3 en 4.

4.8 Uitwerking en resultaten Wieringermeerpolder

4.8.1 Geofysische metingen en geohydrologische profielen

Ook in de Wieringermeer is met behulp van CVES metingen in kaart gebracht hoe de zoutverdeling in de ondergrond is. Hier is geen totale raai over de breedte van de polder gemeten maar zijn op een aantal plaatsen specifiek fenomenen in kaart gebracht.

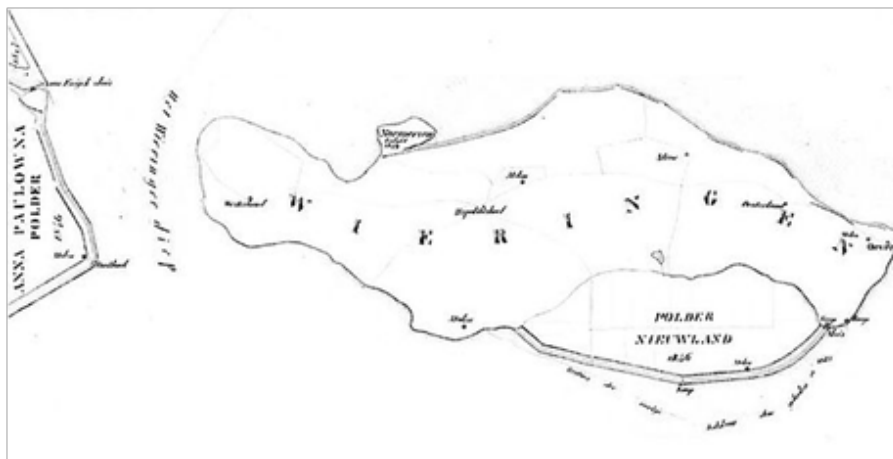


Figuur 4.26 Locaties CVES metingen in de Wieringermeerpolder geprojecteerd op de met het grondwatermodel berekende zoutbelasting (4.9.2).

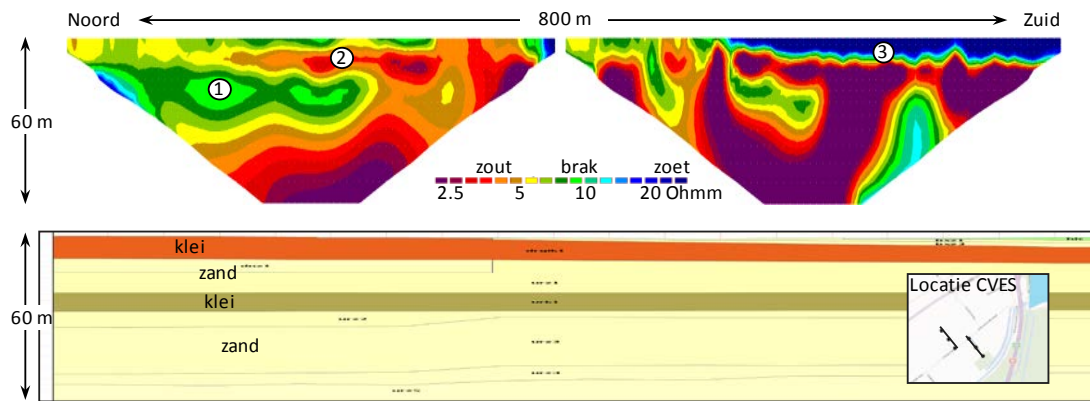
Polder Nieuwland, Wieringen

Het eiland Wieringen heeft gedurende het gehele Holocene boven zeeniveau. Het is een infiltratiegebied met een eigen zoetwaterbel. De polder Nieuwland is rond 1846 teruggewonnen van de zee nadat het met een dijkdoorbraak in 1683 verloren was gegaan. Figuur 4.28 geeft twee CVES metingen die in het verlengde van elkaar zijn genomen in polder Nieuwland. De CVESsen tonen de complexiteit van de zoet-zout verdeling wat het gevolg is van de bewogen geschiedenis. Bij (1) is een zoet/brak watertong te zien vanaf Wieringen richting het zuiden naar lager gelegen polder toe. Deze tong wordt aan de bovenkant begrensd door een kleilaag (2).

In het zuiden (3) is een zoetwater lens aanwezig die een dikte heeft tot 15meter. Deze zoetwater lens is ontstaan als gevolg van de drooglegging van de Wieringermeer begin jaren '30 van de vorige eeuw. Er ontstond een omkering van de grondwaterstroming, namelijk van boven naar beneden richting de Wieringermeerpolder, hierbij is het zoute water uit de ondergrond weg getrokken en een dikke zoetwater lens door neerslag gevormd.



Figuur 4.27 Kaart van Wieringen omstreeks 1849 met daarin polder Nieuwland (<http://nl.wikipedia.org/wiki/Wieringen>).

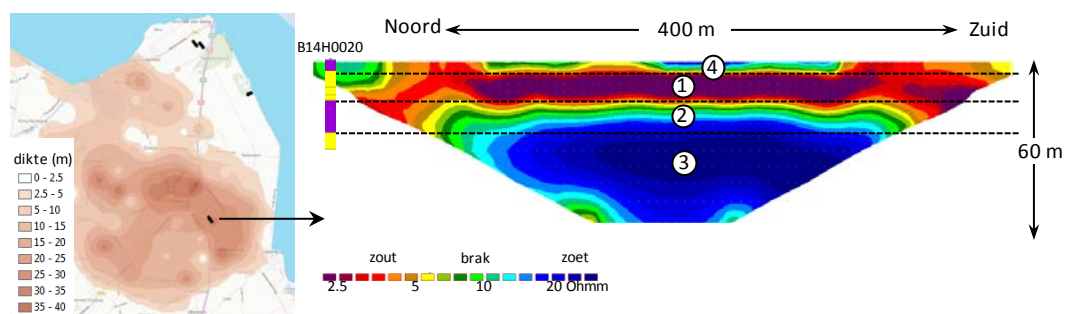


Figuur 4.28 a) CVES metingen in de polder Nieuwland en b) doorsnede op basis van REGIS II.1.

Inversie bij Middenmeer

In een periode van ca. 2500 jaar geleden tot 700 geleden was het gebied van de Wieringermeer nog land. Door de stormen van onder andere de 12e eeuw was het gebied onder water gelopen en onderdeel van de zee geworden de Wieringermeerpolder is pas recent teruggewonnen op de zee (1930). Gezien de recente inpoldering zijn de hoge chlorideconcentraties toe te kennen aan de recente verleden waarin de Wieringermeer nog onderdeel uitmaakte van de Zuiderzee.

Het voorkomen van een inversie (zout water op zoet water) is sterk gerelateerd aan een combinatie van de dikte en verspreiding van de kleiige Eemafzettingen en de tijdens het Holoceen gevormde geulen die in de Wieringermeerpolder het basisveen doorsnijden (zie meer hierover in hoofdstuk **Error! Reference source not found.** en Figuur 4.29). Op plekken waar deze slecht doorlatende laag aanwezig is kon het zout water niet doordringen tot de diepere lagen en ligt het zout (1) op de Eem klei (2) zoals te zien in de CVES meting. Onder de Eemklei bevindt zich een zandlaag met zoet water (3). De dikte van de inversielaag is gecorreleerd met de dikte en diepte van het Holocene pakket, en is maximaal op de plaatsen waar voormalige Holocene geulen hebben gelopen (4). In de CVES is te zien dat deze Holocene laag voor een deel weer is verzoet.

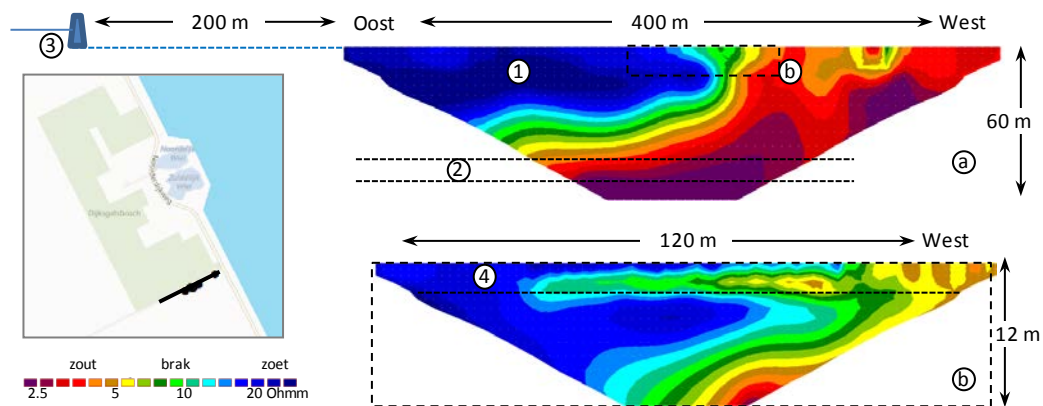


Figuur 4.29 a) Geïnterpreteerde inversie op basis bestaande metingen Dinoloket. b) CVES metingen bij Middenmeer.

Verzoeting bij de IJsselmeerdijk

Een groot deel van het water in de ondergrond van de Wieringermeerpolder is zout (die hoofdstuk 2). Maar sinds de afsluiting van het IJsselmeer en inpoldering van de Wieringermeer infiltreert vanuit het IJsselmeer zoetwater in de ondergrond. Met een CVES meting vanaf ongeveer 200m vanaf de IJsselmeerdijk naar het westen is gemeten hoe groot deze zoetwaterintrusie is (Figuur 4.30). Deze meting toont de zoetwaterintrusie (1) vanaf het IJsselmeer (3). De zoetwaterintrusie wordt aan de onderkant begrensd door een kleilaag (2) en strekt zich ongeveer 400m landinwaarts uit. Als wordt ingezoomd (b)

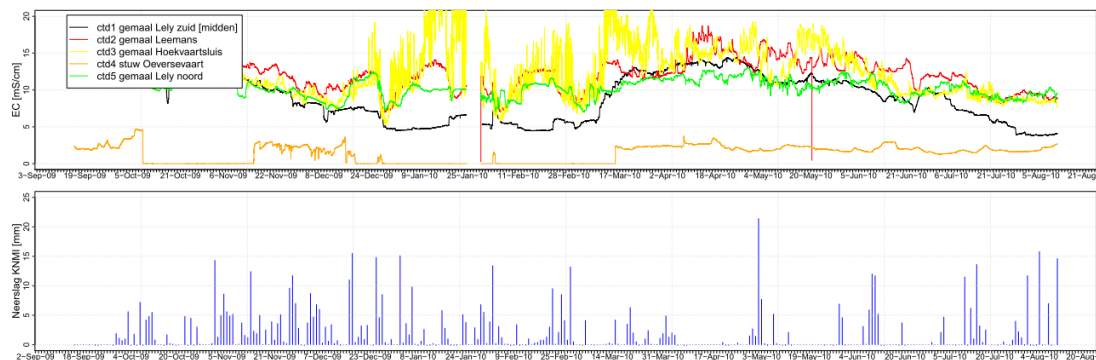
is ook zichtbaar dat verzoeting van de deklaag optreedt (4). Het zoetwater is dus in de 80 jaar dat het IJsselmeer zoet is, ongeveer 400m onder het oppervlak doorgedrongen. Deze meting toont dat het zoete water zich hier met een gemiddelde snelheid van 6m/jaar in de ondergrond verplaatst.



Figuur 4.30 a) CVES meting bij IJsselmeerdijk met intrusie van zoet water naar de polder. b) Detailmeting waarin ook de verzoeting van de deklaag zichtbaar is.

4.8.2 Variatie in de tijd van zoutgehalten in het oppervlaktewater

In bijlage 11 is een overzicht opgenomen van de gemeten EC waarden in de watergangen van de Wieringermeerpolder. De meetpunten zijn gekozen bij gemalen en de stuw Oeversevaart. De ligging van de meetlocaties van de EC in de watergangen is opgenomen in Figuur 4.2. De in bijlage 11 opgenomen meetseries hebben betrekking op de meetperiode juli 2009 tot augustus 2010 (Figuur 4.31). De resultaten van de metingen zijn verder niet gebruikt in deze studie.



Figuur 4.31. Gemeten EC waarden in de de Wieringermeerpolder in de periode september 2009 tot augustus 2010.

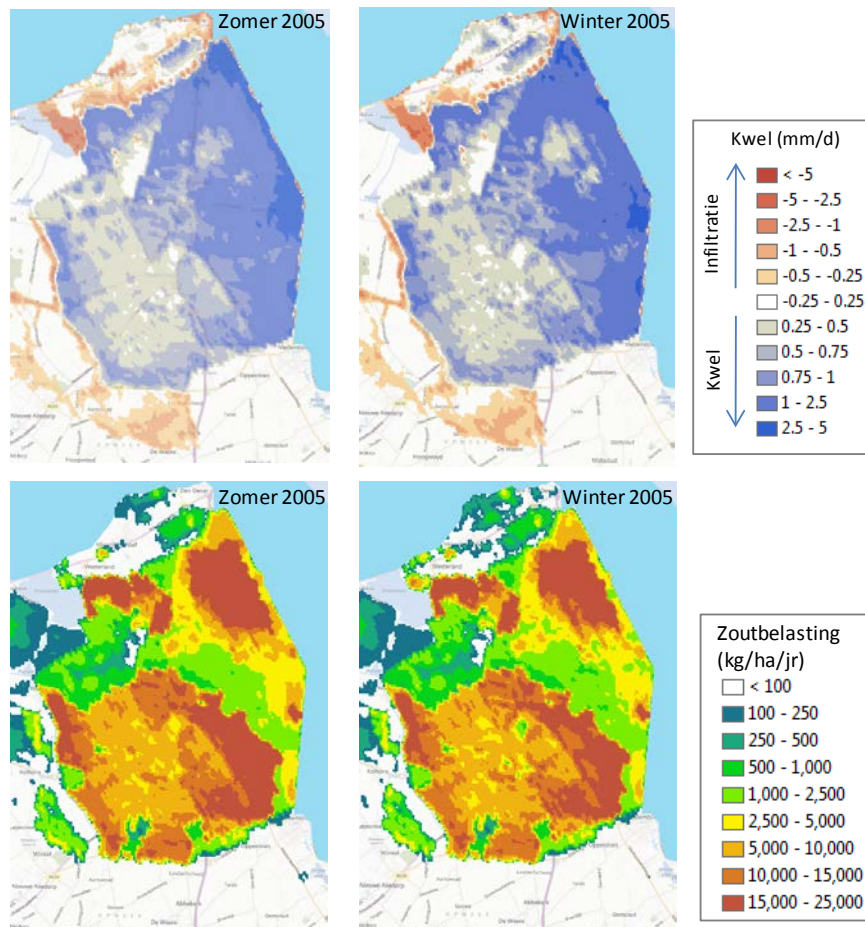
4.9 Resultaten modelsimulaties Wieringermeerpolder

4.9.1 Huidige kwel en zoutbelasting

Voor een beschrijving van het grondwatermodel wordt verwezen naar bijlage 13. In deze paragraaf worden de belangrijkste resultaten besproken en vergeleken met het conceptuele model en de metingen uit de voorgaande paragrafen. Het betreft een detailbeschrijving van de resultaten op basis van het regionale model. Uit de berekeningen blijkt dat in bijna de gehele polder een kwelstroom bestaat variërend van 0 tot enkele mm/dag. De kwel is het sterkst in het oostelijk deel van de polder nabij het IJsselmeer (Figuur 4.32a). Met het model zijn ook de zoutbelastingen berekend

(zoutbelasting = kwelflux * zoutconcentratie). Die belasting is het grootst in dezelfde bovengenoemde gebieden (Figuur 4.32b). Echter de ruimtelijke verschillen van de zoutbelasting zijn veel meer geprononceerd. De reden is dat in de gebieden van de oostelijke Wieringermeer, waar de kwel relatief groot is, ook de zoutconcentratie van het diepe grondwater hoog zijn.

Het regionale grondwaterstromingssysteem wordt gedreven door het relatief grote en constante peilverschil tussen de diepe Wieringermeerpolder en de omliggende hoger gelegen polders en IJsselmeer. Om die reden is er weinig verschil tussen de kwelstroom en zoutbelasting in zomer- en winterperiode. Dit bevestigt het concept beschreven in hoofdstuk 3 dat alle tijdsfluctuaties van de zoutgehalten in de watergangen alleen maar het gevolg zijn van de activiteit van de perceels- en drainagesystemen en de inlaat.



Figuur 4.32. Gesimuleerde kwel- en zoutbelasting van de Wieringermeerpolder in mm/dag voor de huidige situatie. (a) de kwelkaart, met in blauw de gebieden met kwellend grondwater, de rode kleur toont infiltrerend grondwater, (b) de zoutbelastingskaart voor de gemiddelde zomer- en wintersituatie.

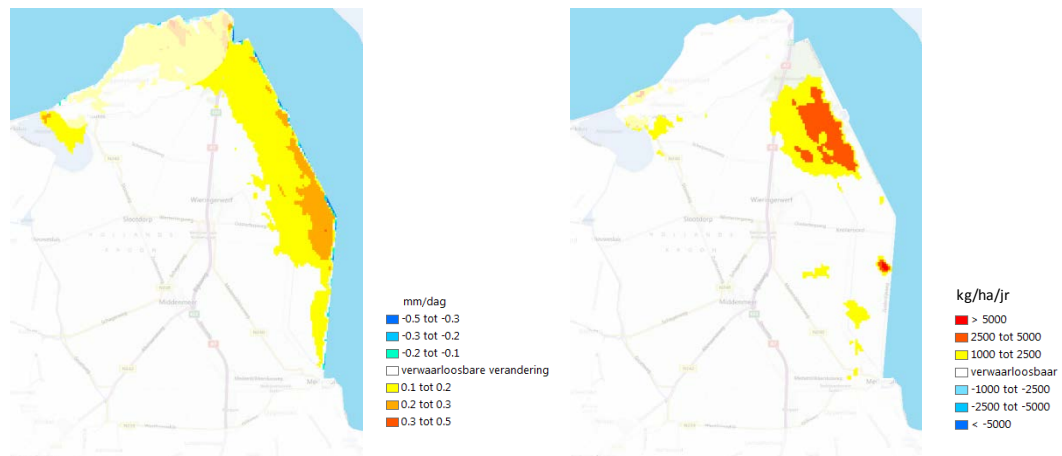
4.9.2 Effecten zeespiegelstijging, bodemdaling en klimaatverandering

Scenario berekeningen zijn gedaan voor de voorspelde bodemdaling in 2050 en voor veranderingen in het neerslagpatroon ten gevolge van klimaatverandering. Hiervoor zijn dezelfde scenario's voor de autonome ontwikkelingen gebruikt als voor het gebiedsdekkende model, voor een uitgebreidere beschrijving hiervan wordt verwezen naar paragraaf 2.3.1.

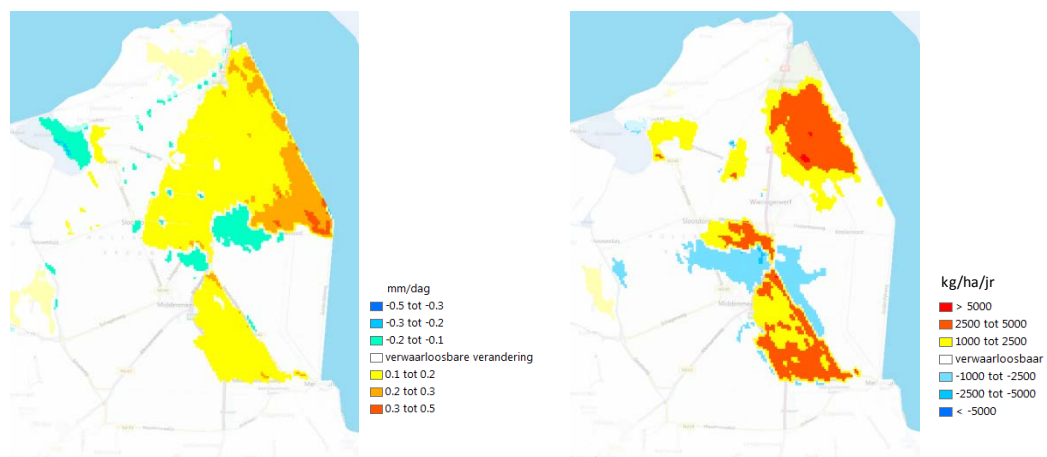
Gevolgen van zeespiegelstijging

Met het gebiedsdekkende model (hoofdstuk 2) is het effect van een meestijgend IJsselmeerpeil van 35cm voor de Wieringermeerpolder doorgerekend. Het effect op de

kwel betreft de oostelijk rand van de polder en reikt tot maximaal 3km met een kweltoename tot 0,3mm/d (Figuur 4.33). Het effect op de toename van de zoutbelasting is beperkt tot het noordoosten rond het Dijkgatsbosch. Voor het overige deel van de polder is het effect van zeespiegelstijging beperkt.



Figuur 4.33. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting als gevolg van een zeespiegelstijging en een meestijgend peil van het IJsselmeer van 35cm.



Figuur 4.34. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting als gevolg van een bodemdaling.

Gevolgen bodemdaling

In de modelberekeningen is uitgegaan van een worst case benadering, waarbij voor elke afdeling de grootste te verwachten bodemdaling binnen de afdeling is gebruikt als waarde voor de hele afdeling. Aangenomen is verder het peil volgt maaiveld principe. Dit betekent dat het peil in de polders evenveel daalt als de bodem.

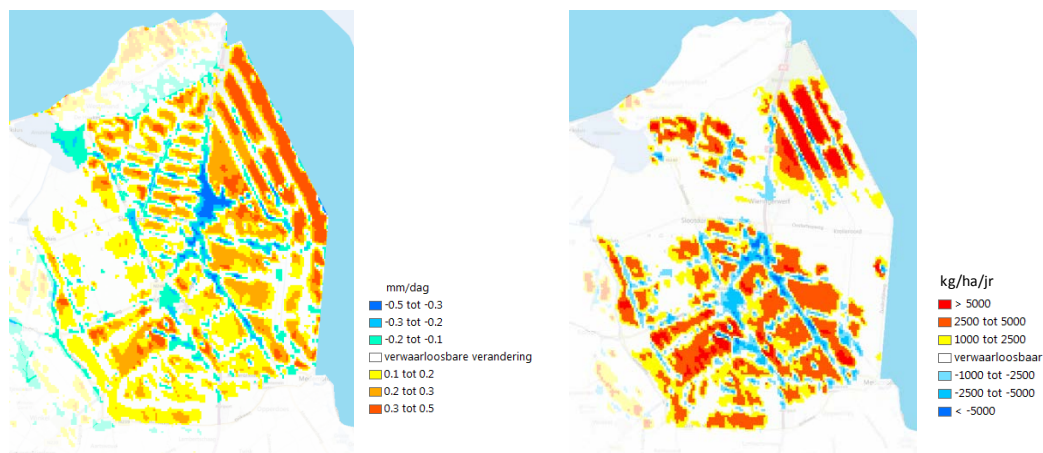
De voorspelde bodemdaling in de Wieringermeerpolder is voor een groot deel relatief gering (zie figuur in H2). In de delen van de Wieringermeer die minder snel dalen, met een bodemdaling van 5-10cm in 2050, neemt de zoutbelasting af. Hier is de kwelflux verkleind omdat de omgeving sneller zal dalen. Echter voor afdeling 3 is de bodemdaling, waar de bodemdaling meer dan 20cm en soms zelfs meer dan 30cm bedraagt, wordt een sterke toename van de zoutbelasting gevonden. Deze kan zeer fors zijn met meer dan 5000 kg/jr/ha.

Gevolgen klimaatverandering

Voor de beschouwing over klimaatverandering wordt er vanuit gegaan dat de polder- en boezempeilen niet veranderen in de toekomst. De veranderingen in het klimaat hebben dan alleen betrekking op het grotere zomerse neerslagtekort volgens het KNMI scenario

W+ 2050 en derhalve lagere grondwaterstanden op de percelen (H2.6). Op voorhand kan dan al worden geconcludeerd dat de regionale grondwaterstromen, inclusief de infiltratie- en kwelstromen, niet veel zullen veranderen tijdens een zomer in het huidige klimaat en die van 2050 volgens het KNMI W+ scenario. Immers tussen de Wieringermeerpolder en de omliggende polders blijven de verschillen tussen de peilen in de watergangen gelijk.

De grondwaterstanden op de percelen zakken in alle polders verder uit in het W+ scenario, maar doen dat in ongeveer dezelfde mate. Alleen langs de oostrand van de polder is een sterkere toename van de kwelflux en de zoutbelasting te verwachten. De reden is dat in het aangrenzende IJsselmeer overall een vast peil heerst, terwijl zomerse grondwaterstanden gemiddeld lager zullen zijn bij klimaatsverandering.



Figuur 4.35. Gesimuleerde verandering in de kwel en zoutbelasting als gevolg van een klimaatsverandering.

Samenvattend

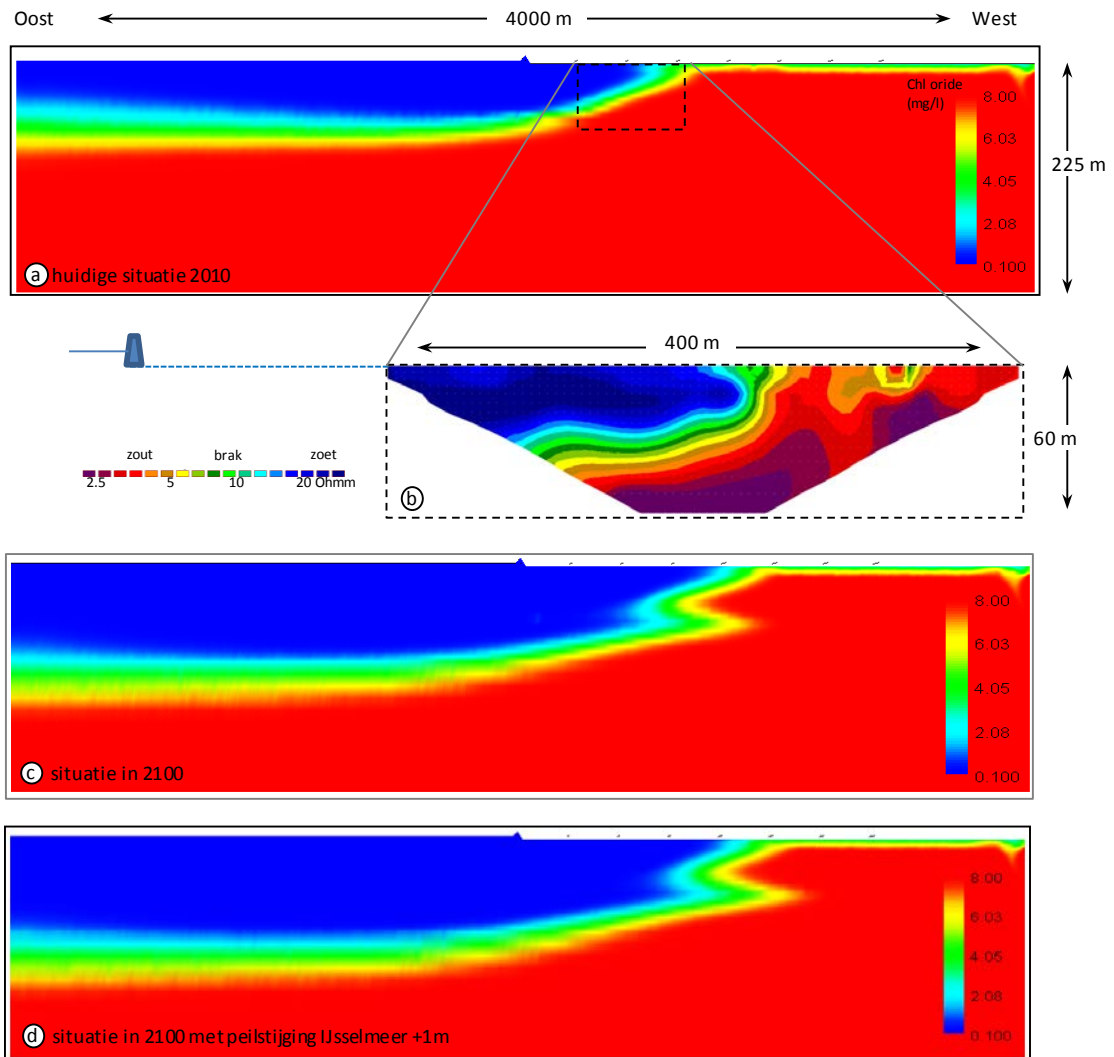
In het oostelijk deel van de Wieringermeer vindt voor alle drie afzonderlijke ontwikkelingen een toename kwel en zoutbelasting plaats. Deze ontwikkelingen versterken elkaar en maakt dit deel van de Wieringermeerpolder een hotspot voor de toename van de zoutbelasting in 2050.

4.9.3 Modelsimulatie van verzoeting grondwater langs IJsselmeerdijk

Met een numeriek grondwatermodel op basis van het programma SEAWAT (Acacia Water, 2011) is gesimuleerd hoe snel en hoe ver het zoete water vanuit het IJsselmeer doordringt in de brakke aquifer onder de Wieringermeer. Voor deze simulatie is een 2D model gebouwd van 4km breed en 225m diep. Het heeft een verticale resolutie van 1m in de deklaag oplopend tot 12m voor de diepste modellagen en een horizontale resolutie van 10m. Dit model is in staat om de zoetwaterintrusie te simuleren zoals in de de CVES metingen is waargenomen (Figuur 4.36a en b).

De simulaties lieten zien dat de zoetwater intrusie zich de komende eeuw nog verder naar het oosten zal uitbreiden. De snelheid van de groei van de intrusie neemt af met de tijd en het model suggereert dat de intrusie zich maximaal tot op een afstand van ongeveer 635m van de IJsselmeerdijk zal gaan uitstrekken. In deze zone achter de dijk zal ook zoete kwel gaan optreden.

Vervolgens zijn met het model verschillende effecten doorgerekend. Hier beperken we ons tot de resultaten voor een peilstijging van het IJsselmeer met 1m. Ook hier laten de simulaties zien dat de zoetwater intrusie zich de komende eeuw verder naar het oosten zal uitbreiden. Het model suggereert dat de intrusie maximaal 100m verder komt vergeleken met een situatie met het huidige peil.



Figuur 4.36. Gesimuleerde zoetwaterinrusie bij IJsselmeerdijk. a) de huidige situatie. b) CVES meting ter vergelijking van berekend resultaat. c) situatie in 2100 onder huidige omstandigheden. d) situatie in 2100 bij een peilstijging IJsselmeer van +1m.

4.9.4 Water- en zoutbalansen

Voor alle afdelingen van de Wieringermeerpolder zijn water- en zoutbalansen opgesteld. De resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage 9b. Dit hoofdstuk beperkt zich tot de oostelijke afdelingen, afdeling 3 en 4.

De Wieringermeer is met 4 aan elkaar gekoppelde afdelingen veel complexer dan de Schermer. Uitslag en chloridegehalte van afdeling 1 zijn afhankelijk van uitslag en chloridegehalte van afdeling 2. Voor afdeling 3 geldt dat zij water ontvangt uit alle afdelingen (afdeling 2 via de overlaat in afdeling 1). De onzekerheid betreffende inlaat (ofwel van buiten de polder ofwel vanuit andere afdelingen) is groot. De oorzaak hiervan is dat slechts de maalstaten bekend zijn, gegevens over inlaat en overlaat (afd. 1 naar afd. 3) zijn nauwelijks bekend. Uit de waterbalansstudie volgt dat met name afdeling 1 een grote hoeveelheid inlaat ontvangt. Dit komt overeen met gegevens ontvangen van HHNK die spreken van grote doorspoelhoeveelheden voor deze afdeling, betrouwbare getallen zijn beschikbaar.

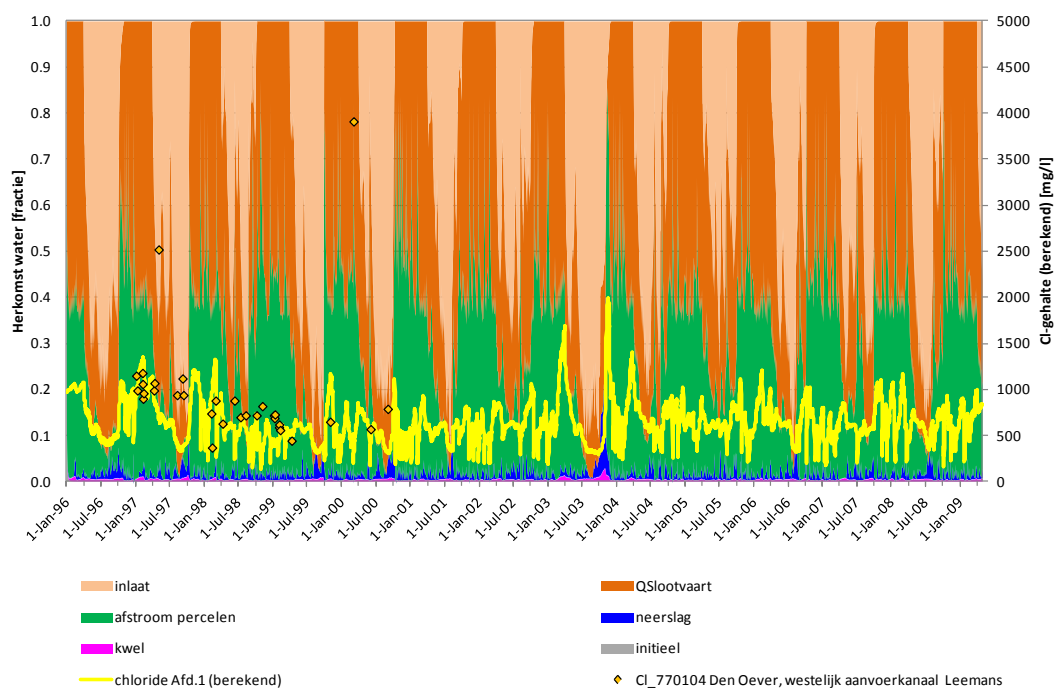
Uit de fractieverdeling van afdeling 3 blijkt dat 30% tot 40% van het water afkomstig uit afdeling 1 (Figuur 4.39). De fractieverdeling van afdeling 1 (Figuur 4.37) laat zien dat het

water hier in de wintermaanden water uit afdeling 2 ontvangt, dit is vooral afstroming van percelen. In de zomermaanden is het vooral inlaatwater dat de afdeling in stroomt en aan de andere kant van de polder uitstroomt naar afdeling 3. De 30% tot 40% uit afdeling 1 in afdeling 3 is dus wisselend vooral inlaatwater (zomer) en water uit afdeling 2 (winter). Het overige water is voor het belangrijkste deel afkomstig van afstroming percelen.

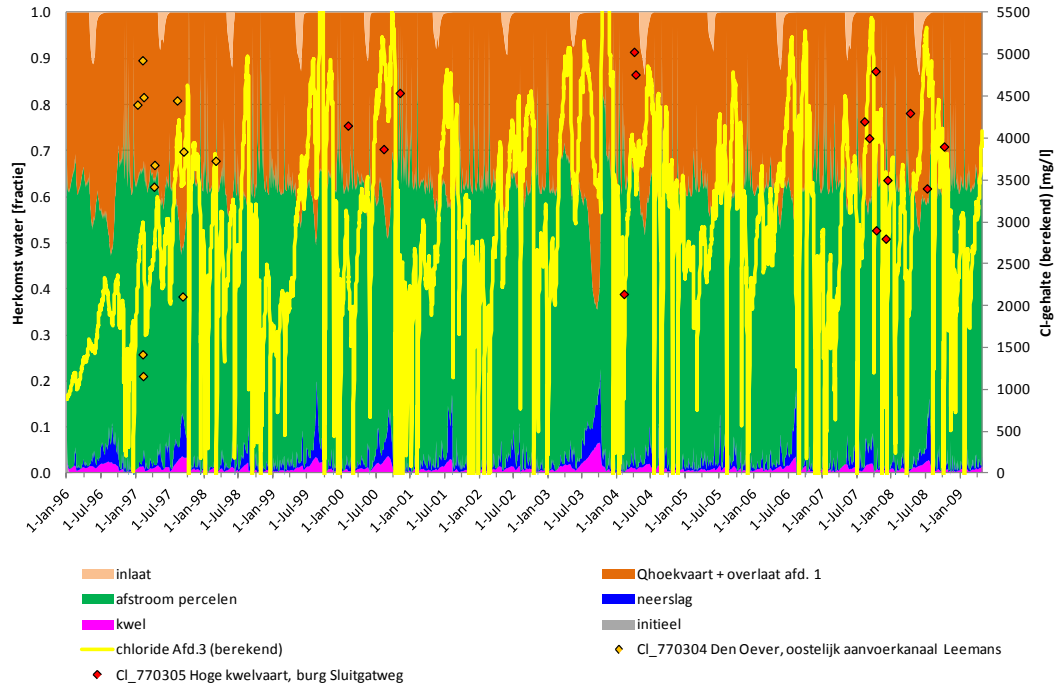
Afdeling 4 reageert als een autonome polder en lijkt daarmee meer op de polders in de Schermer. De afstroming van de percelen levert de grootste bijdrage levert aan de hoeveelheid water in het oppervlaktesysteem (Figuur 4.39).

Voor alle afdelingen geldt dat zowel in droge als natte jaren is de hoeveelheid neerslag en kwel direct naar de sloten toe slechts een kleine component in het oppervlaktewatersysteem.

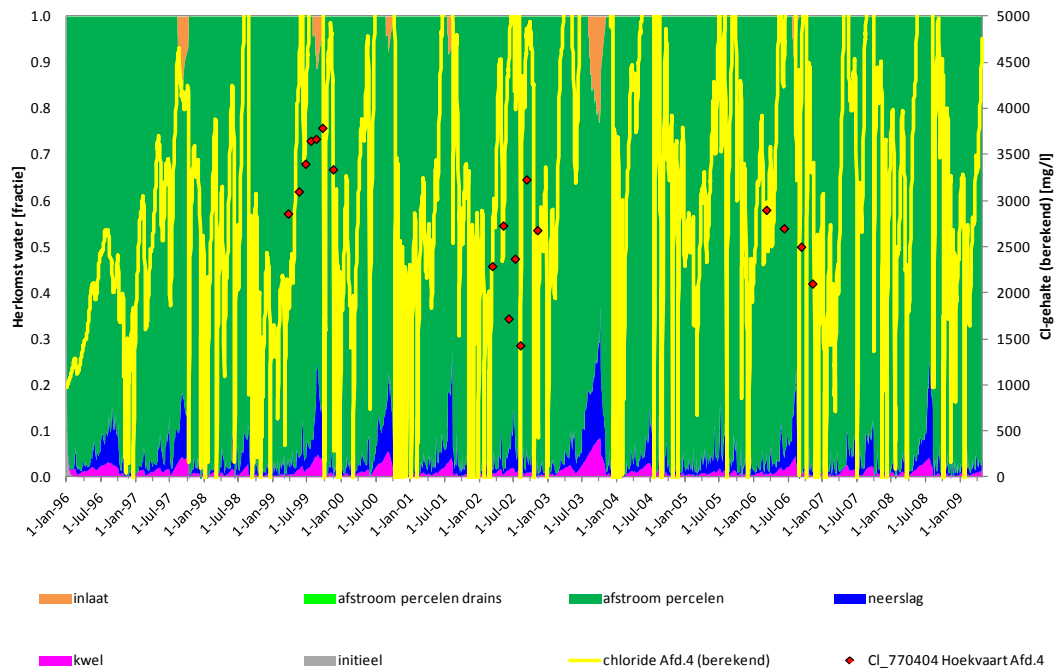
De hoeveelheid zout in het oppervlakte water is gerelateerd aan de bovenbeschreven verdeling van de kwantitatieve bijdrage aan het oppervlaktewater, in combinatie met de waterkwaliteit van de verschillende componenten. In afdeling 4 is bijna 100% van het chloride in het oppervlaktewater afkomstig van de percelen. Dat is logisch omdat dit in de waterbalans ook de grootste post vormt. In afdeling 1 daarentegen, waar de kwel flux kleiner is dan in de rest van de polder en met name het aandeel water dat wordt ingelaten vanuit de vaarten veel groter is, is het water uit inlaat verantwoordelijk voor ongeveer de helft van de chloride (Figuur 4.40). Afdeling 3 wordt voor wat betreft de waterhoeveelheden 30% - 40% bepaald door water uit afdeling 1. Uit Figuur 4.41 wordt duidelijk dat dit voor het zoutgehalte niet opgaat, het hoge zoutgehalte is vooral afkomstig uit de percelen.



Figuur 4.37. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in afdeling 1 op basis van de waterbalans.



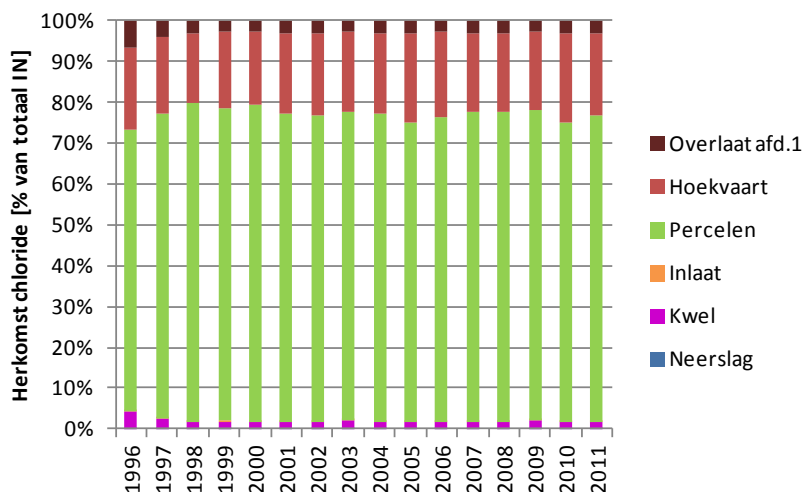
Figuur 4.38. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in afdeling 3 op basis van de waterbalans.



Figuur 4.39. Fractieverdeling herkomst oppervlaktewater in afdeling 4 op basis van de waterbalans.



Figuur 4.40 Herkomst inkomend chloride in g/m³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor afdeling 1 van de Wieringermeer (berekening oppervlaktewaterbalans).



Figuur 4.41 Herkomst inkomend chloride in g/m³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor afdeling 3 van de Wieringermeer (berekening oppervlaktewaterbalans).



Figuur 4.42 Herkomst inkomend chloride in g/m³ als percentage van de post IN op jaarbasis voor afdeling 4 van de Wieringermeer (berekening oppervlaktewaterbalans).

4.10 Resultaten SOBEK-modellering

Eén van de vragen binnen het onderzoek heeft betrekking gehad op welk schaalniveau gegevens nodig zijn en op welk schaalniveau processen moeten worden gesimuleerd zodat de zoutbelasting en zoutconcentraties in een polder op gefundeerde wijze kan worden bepaald.

De modellen zijn in het kader van dit project gemaakt door Royal Haskoning (bijlage 12). Voor een deelpolder binnen de Zuid-Schermer is ten slotte een waterkwaliteitsmodel gemaakt in Sobek-WQ. Dit rapport beperkt zich tot het beschrijven van de belangrijkste resultaten.

4.10.1 Resultaten kwantiteitsmodellen

Er zijn twee modelbenaderingen gekozen waarmee een droog (2003), gemiddeld (2005) en een nat jaar (2007) zijn doorgerekend. Een zogenaamde eerste trap model, voor zowel de Wieringermeerpolder als de Schermer (Figuur 4.4), op basis van de primaire waterlopen en bijbehorende kunstwerken en RR module. De eerste trap is de traditionele manier om een polder in een oppervlaktewatermodel te schematiseren.

De tweede trap betreft het opzetten van een model met daarin naast de primaire waterlopen ook de secundaire en tertiaire waterlopen. Dit om de invloed van de verschillende schalen van modelleren en verziltingsprocessen op perceelsniveau in het bijzonder te kunnen simuleren. Voor de Wieringermeerpolder is uitgegaan van de afdelingen 3 en 4, voor de Schermer betreft het de Zuid-Schermer.

De tweede trap modellen bevatten alle watergangen en kunstwerken van Schermer-Zuid en Wieringermeerpolder-Oost. Voor de tweede trap waren weinig gegevens beschikbaar van de secundaire en tertiaire watergangen en kunstwerken. Hiervoor zijn daardoor meer aannames gedaan dan voor de eerste trap modellering. De kavelsloten zijn grotendeels niet ingemeten en ook veel kunstwerken hebben in de database van het hoogheemraadschap geen dimensies of zijn niet aanwezig.

Het verschil tussen de eerste en tweede trap modellen zit in het volgende. Voor de Wieringermeerpolder geldt, dat het tweede trap model qua afvoer een rustiger en beter verloop laat zien in een droge periode. Dit model benadert dan de werkelijkheid beter.

Het verschil tussen het eerste en tweede trap model van de Schermer is minder groot qua afvoeren. Toch is voor nadere studies het gebruik van het 2e trap model aan te bevelen, omdat het drainagesysteem nauwkeuriger is gemodelleerd (onderscheid tussen sloten-, greppels-, buisdrainagesysteem). Het neerslag-afvoer proces is hierdoor beter gemodelleerd.

Achteraf kijkend is de gevolgde werkwijze van eerste naar tweede trap model een goede werkwijze gebleken. Dus het werken van grof (schematisatie met hoofdwaterlopen) naar fijn (schematisatie secundaire stelsel en drainage- en greppelsysteem) is nuttig. Het verdient geen aanbeveling om bij vergelijkbare (gedetailleerde) studies gelijk te beginnen met een tweede trap model.

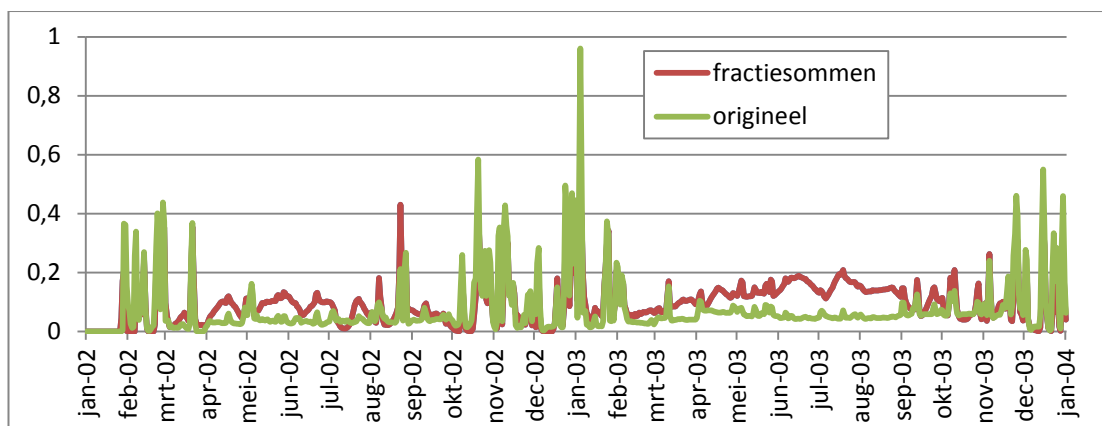
4.10.2 Resultaten waterkwaliteitsmodellering

De basis voor de waterkwaliteitsberekeningen zijn de tweede trapsmodellen kwantiteit. Uit de eerste analyse van de modellen bleek dat de modellen niet direct geschikt waren voor toepassing als WQ model. Om berekeningen mogelijk te maken is een uitsnede model gemaakt van polder I (uitsnede 2^e trap de Schermer, Figuur 4.4) om zo voor een

kleiner gebied berekeningen mogelijk te maken. De reden voor deze polder is dat hier in 2009, in het kader van deze studie, meetseries van de waterkwaliteit zijn opgebouwd.

Met het nieuwe model van polder I zijn fractiesommen gemaakt om te bepalen hoe de fracties in het basismodel (drainagewater, slootkwel en neerslagoverschot) zijn verdeeld. Daaruit bleek dat de resultaten niet te correleren zijn aan de gemeten chlorideconcentraties. Juist in het oostelijke deel waar hoge chlorideconcentraties gemeten zijn blijkt uit de modelberekeningen dat de fractie waterinlaat in de zomer een groot aandeel heeft. De zoute kwel is in het basismodel waarschijnlijk onderschat.

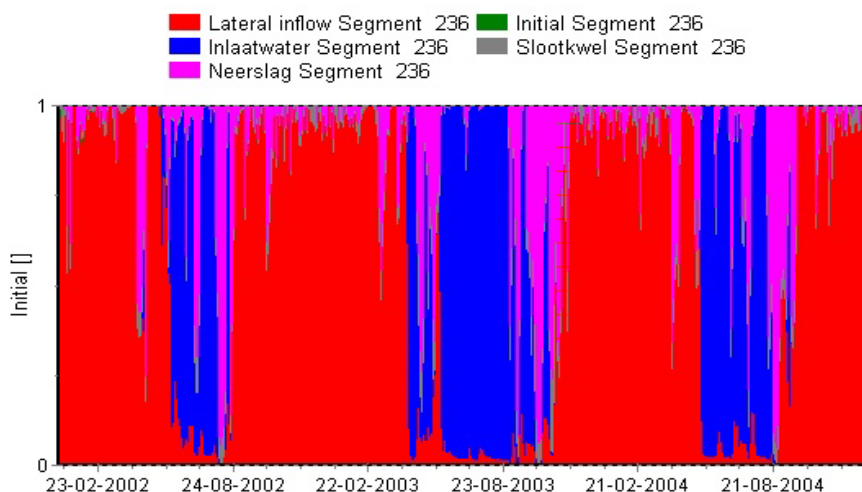
Om de effecten van de verdere verfijning van de invloed van de (zoute) kwel te bepalen is de in het model opgegeven constante kwel vervangen door de kwel zoals die is berekend in het grondwatermodel (4.6.1). Hiertoe zijn per afwateringseenheid kweltabellen gegenereerd voor 2002 t/m 2003 en in het Sobekmodel verwerkt. Dit is gedaan voor de slootkwel en voor de kwel in de RR-unpaved knopen (drainagewater).



Figuur 4.43 Debiet bij lozingspunt van polder I en toont het verschil met het uitgangsmodel.

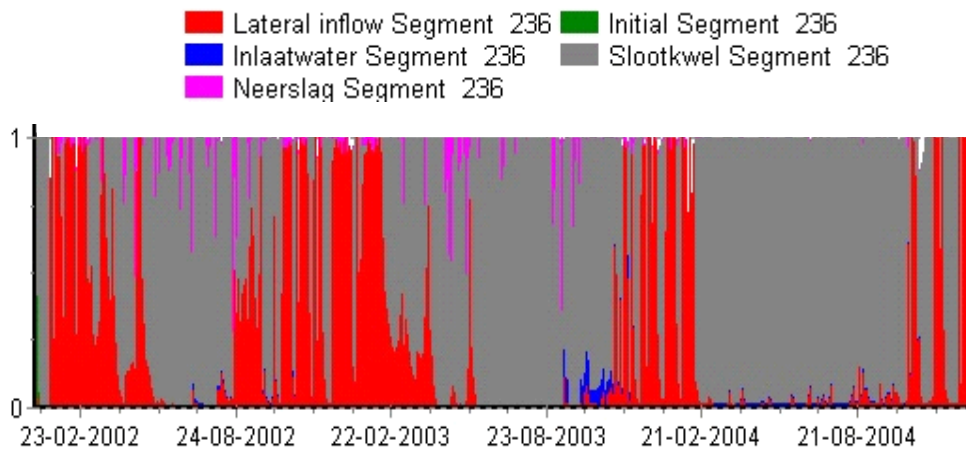
Fractieberekeningen

Uit de fractieberekeningen is op te maken hoe de samenstelling van het water gedurende het jaar is. Uitgelicht wordt als voorbeeld een doorgaande sloot (Figuur 4.44). In deze doorgaande sloot wordt de waterkwaliteit gedomineerd door het drainagewater. De invloed van de inlaat is erg groot (dominant) in de zomer.



Figuur 4.44 sectie 236 ter plaatse van het centrale gedeelte van het noordoostelijke deelgebied. Voor aanpassingen.

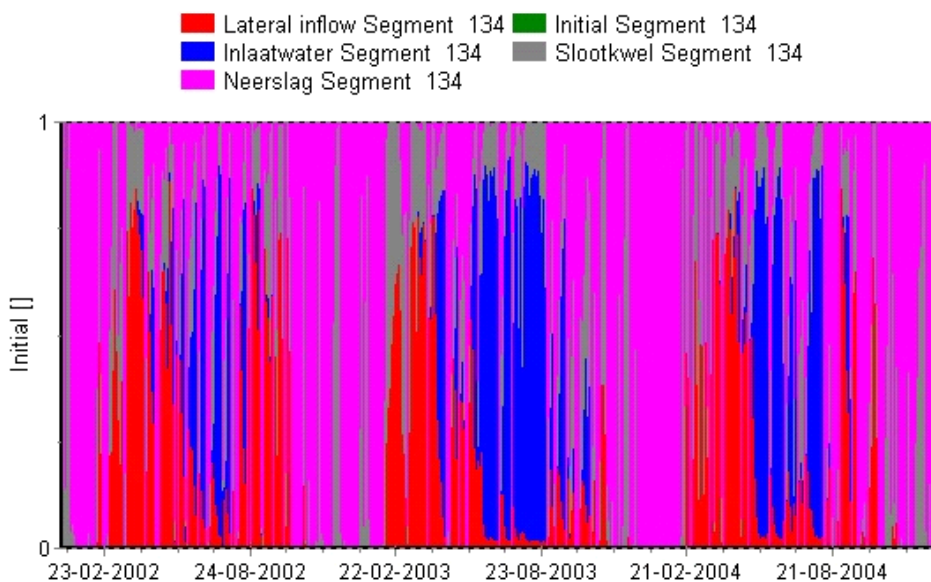
Om de effecten van de kwel op de fractieverdeling te bepalen zijn vervolgens fractiesommen gemaakt met verfijning van de kwel in het model zoals die is berekend in het grondwatermodel. De resultaten van deze fractiesommen komen beter overeen met de gemeten chlorideconcentraties.



Figuur 4.45 sectie 236 ter plaatse van het centrale gedeelte van het noordoostelijke deelgebied. Na aanpassingen.

Rekenkundige opmerkingen

Door de wijze van modelleren met puntlasten op primaire en secundaire watergangen maar niet op alle tertiaire watergangen (reaches) leidt tot onduidelijke en onjuiste resultaten. Zo duurt het te lang voordat een puntlast zich in de betreffende afwateringseenheid heeft verspreid. Uit de fractiesommen blijkt dat de fractie initieel circa de eerste 10 dagen langzaam afneemt. Kortom deze fracties dienen zich eerst te verspreiden over de gehele lengte van een watergang voordat betrouwbare berekeningen (van fracties) kunnen worden gemaakt.



Figuur 4.46 Fracties berekend voor kop sloot 1 sectie 134.

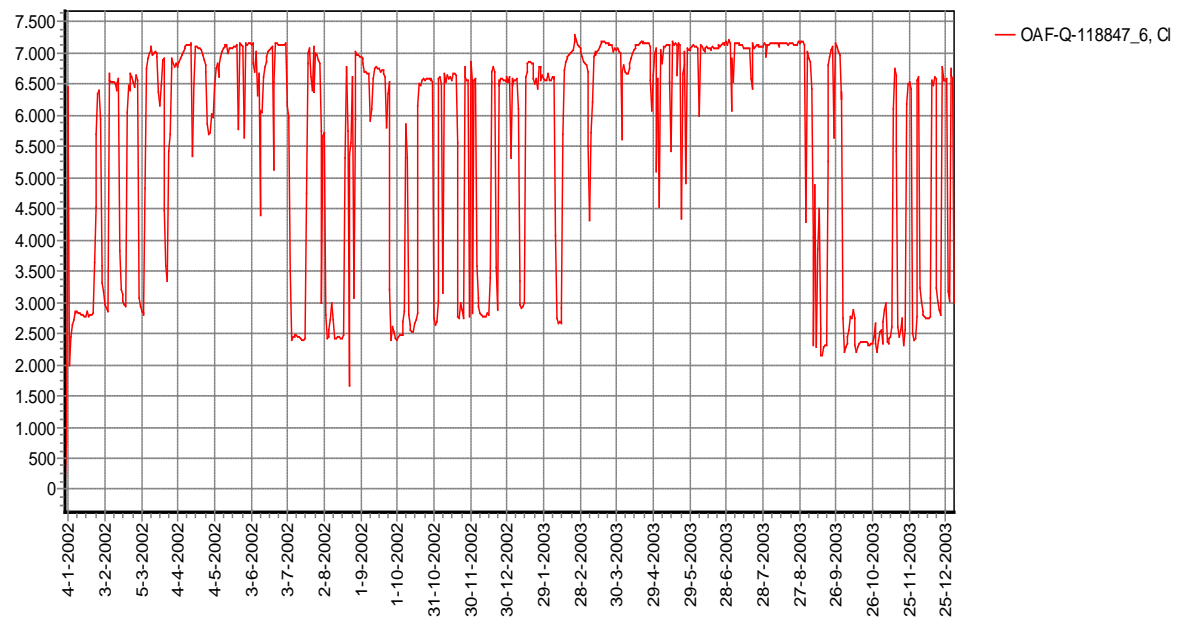
Uit de resultaten blijkt dat er sprake is van in de tijd sterk wisselende fractieverdelingen in één segment (Figuur 4.46). Dit kan duiden op instabiliteit en ook is de invloed zichtbaar van de ligging van de diverse knopen ten opzichte van het betreffende delwaq segment. De meest nabijgelegen knoop (fractie) reageert sneller dan andere knopen die verder van het betreffende segment af zijn gelegen.

Berekening chlorideconcentraties

Om te bepalen of het mogelijk is om met het model de chlorideconcentraties betrouwbaar te berekenen zijn de chlorideconcentraties van de verschillende fracties zo goed mogelijk in het model opgenomen. De concentratiereksen in de slootkwel en de drainagewater zijn uit het grondwatermodel overgenomen (4.6.1). Voor de inlaat en het regenwater is uitgegaan van een chlorideconcentratie van 250 mg/l en 10 mg/l.

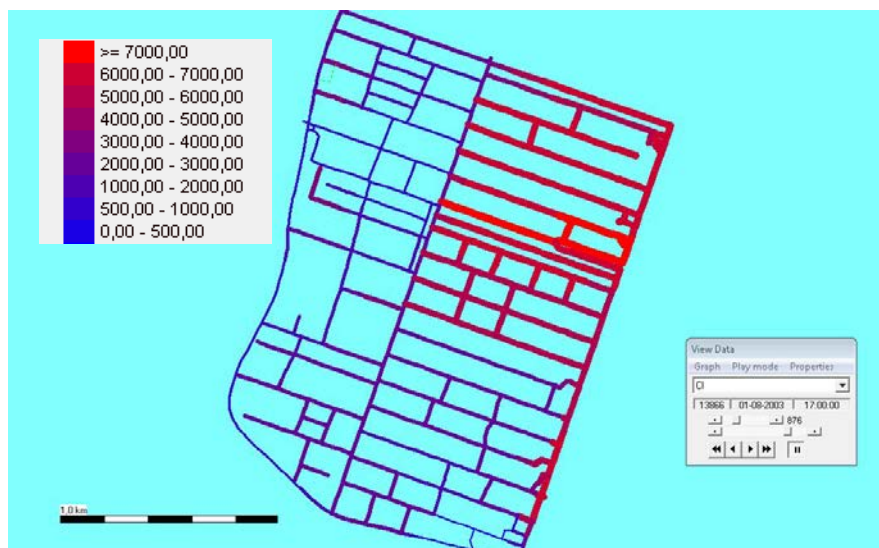
Het is niet mogelijk om alle fracties chloridegehalten te geven omdat het niet mogelijk is chlorideconcentraties in de RR module te verwerken. De enige mogelijkheid is om dat te doen in een RR-CF knoop, daarvoor is hier ook gekozen. Hierdoor draagt niet alleen het onverharde gedraineerde gebied maar ook het verharde oppervlak bij aan de fractie "drainagewater". Aangezien dat verharde oppervlak in de polder I klein is zal het effect echter gering zijn. Door bovenstaande wordt de chlorideconcentratie in de neerslag (10 mg/l) verwaarloosd. Aangezien er zomers ook vrijwel geen neerslag is zal dat nauwelijks invloed hebben.

Uit de berekeningen blijken de chlorideconcentraties redelijk goed overeen te komen met de gemeten waarden. Dat is ook logisch aangezien de fractie zoute kwel in de zomer domineert en de concentraties in het kwelwater zeer hoog zijn. Uit de resultaten blijkt echter ook dat er wel erg grote schommelingen optreden in een betrekkelijk korte tijd (Figuur 4.47). Dit komt waarschijnlijk niet overeen met de werkelijkheid en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de modellering met puntlasten.



Figuur 4.47 Delwaqsegment ter plaatse van het centrale gedeelte van het noordoostelijke deelgebied.

Naast de concentraties in enkele relevante segmenten is ook gekeken naar de ruimtelijke spreiding en het verloop daarvan in de tijd (een still is opgenomen in Figuur 4.48). De ruimtelijke spreiding van de chlorideconcentraties komt redelijk overeen met de gemeten chlorideconcentraties. In het verloop van de berekende concentraties in de tijd blijkt er een erg grote variatie is, die niet als reëel wordt beschouwd.



Figuur 4.48 Berekenen chlorideconcentraties op 1 augustus 2003 in polder I, de Schermer.

Analyse resultaten

Het model kan voor waterkwantiteit wel geschikt zijn, maar niet voor gedetailleerd onderzoek van de waterkwaliteit.

Door de modelschematisatie van drainage, kwel en neerslag als puntlasten in plaats van een gelijkmatige diffuse verdeling over de waterlopen, zoals in de werkelijkheid, is het verloop van concentraties in de tertiaire waterlopen niet goed te berekenen. Hiertoe dient het model nog verder te worden verfijnd. Er dient per reach (eigenlijk per segment) een set met knopen te worden gemaakt (met een gelijkmatige belasting over de gehele lengte).

4.11 Conclusies

De geleidbaarheidsmetingen van het oppervlaktewater en de geofysische metingen van de ondergrond bevestigen het conceptuele hydrologische model voor diepe droogmakerijen zoals de Schermer en de Wieringermeer.

Wat betreft de grondwaterstroming overheerst in diep droogmakerijen opwaartse stroming of kwel. Die manifesteert zich aan de randen vaak als zoet kwelwater, dat is geïnfilteerd in de omliggende ondiepere polders en boezemwateren. In de meer centrale gedeelten is het kwelwater vaak brak. Het brakke kwelwater komt van grote diepte en is gevormd door verzilting van de Pleistocene sedimenten ten tijde van de Midden-Holocene transgressie. Dit komt vooral goed waarneembaar in oude VES metingen, die opnieuw zijn geïnterpreteerd, en de voor dit onderzoek uitgevoerde EM en CVES metingen in polders de Schermer en de Wieringermeer, die respectievelijk zijn drooggelegd in 1635 en 1930.

De zoutbelasting hangt af van de sterkte van de kwelstroom en het zoutgehalte in het watervoerende pakket direct onder de deklaag. In polder de Schermer is die belasting het grootst in het zuidelijke gedeelte van de polder nabij het Alkmaardermeer. In de Wieringermeer is dat het noordoostelijk deel bij het IJsselmeer. Dit blijkt onder andere uit berekeningen met grondwatermodellen voor deze polders.

Het patroon van zoete en brakke kwel is geen stationaire situatie. De zoete kwel langs de randen van de polders wint langzamerhand terrein op het brakke kwel gebied. In polder de Schermer beperkt de brakke kwel zich tot het centrale zuidelijke gedeelte. Met name

langs de zuidelijke dijk heerst een sterke kwelstroom. Dat in deze oude polder het kwelwater relatief dichtbij de dijk nog steeds brak is, kan worden verklaard uit het feit dat het Alkmaarder pas begin van de vorige eeuw zoet werd. Uit de geofysische metingen en de grondwatermodellering blijkt dat de noordwaartse verzoeting van het grondwater aan de zuidzijde gestaag maar langzaam verloopt.

Een dergelijk proces van verzoeting van grondwater is ook geconstateerd in de jongere Wieringermeerpolder langs de IJselmeerdijk. Ook hier zijn geofysische metingen en berekeningen met een grondwater model uitgevoerd. Het zoete grondwater reikt inmiddels zo'n 400 m in de polder en bevestigt de voorspellingen van Mazure (1936) in 1936

Zoals gezegd is de verzoeting van het grondwater een traag proces. Voor wat betreft de beleidsvorming dienen de waterbeheerders er echter van uitgaan dat de brakke kwel in de diepe droogmakerijen nog eeuwen zal aanhouden en dat mitigerende of adaptieve maatregelen deze eeuw noodzakelijk blijven.

Uit berekeningen met het grondwatermodel blijkt verder dat autonome veranderingen van bodem, klimaat en zeespiegel een toename van de kwel en zoutbelasting in de Wieringermeerpolder te verwachten is. In de Schermer ligt dit anders, daar is de veel minder invloed van de genoemde factoren. De klimaatverandering houdt wel in dat de frequentie van droge zomers zal toenemen. Dat betekent dat kritische situaties met betrekking tot de beschikbaarheid van zoet water vanuit het IJsselmeer ook vaker zullen voorkomen.

De zoutgehalten in de watergangen in de brakke kwelgebieden vertonen een grote seizoenmatige fluctuatie zo blijkt uit de EC metingen (2000 tot 20000 uS/cm). In de winter overheerst de afstroming van zoet water van de percelen via drains en greppels. Op die percelen vormen zich dan zoetwater lenzen.

De zoetwaterlenzen verschillen in dikte en daardoor ook in de mate van buffering. Onder begreppelde percelen zijn deze dikker onder gedraineerde percelen. Onder begreppelde percelen vindt meer buffering van zoetwater plaats. Ook speelt kwelflux, de ligging van de drainagebasis en doorlatendheid daarbij een rol. Dit is goed te zien in geofysische CVES metingen (hoofdstuk 3).

5 NUT EN NOODZAAK VAN DOORSPOELEN

5.1 Inleiding

In polders in Laag-Nederland wordt in het zomer seizoen water ingelaten. Dit gebeurt om verschillende redenen. Ten eerste zijn er natuurlijke verliezen vanuit het oppervlaktewater die gecompenseerd moeten worden. Er is in het voorjaar en de zomer sprake van een neerslagtekort. De verdampingsverliezen van het oppervlaktewater moeten dus worden aangevuld. Een ander natuurlijk verlies is de wegzijging van water vanuit de watergangen naar het grondwater. Ten tweede wordt ook water ingelaten zodat boeren dit kunnen gebruiken voor beregening van het land en het drenken van hun vee. Er wordt echter vaak meer water ingelaten dan de natuurlijke verliezen en het gebruik door boeren. De reden hiervoor is de verzilting die in de zomer optreedt. De polder wordt dan "doorgespoeld" om de verzilting tegen te gaan, zodat het water aan bepaalde basisnormen voldoet en bijvoorbeeld de beregening en de veedrenking niet in gevaar komt. Dit deel van de inlaat is dus bedoeld om kwaliteit te handhaven. Het idee is dat het doorspoelen van polders veel efficiënter en zuiniger kan plaatsvinden door een betere afstemming op het gebruik. In dit hoofdstuk zal het begrip doorspoelen gebruikt worden voor het extra water dat wordt ingelaten voor agrarisch gebruik. Als boeren geen water zouden gebruiken voor beregening en veedrenking zou de peilhandhaving zich namelijk richten op de natuurlijke verliezen. De doorspoelhoeveelheden zijn de ingelaten hoeveelheden min de natuurlijke verliezen.

Het doel is om de hypothese te onderzoeken dat verandering van doorspoelhoeveelheid de situatie in de polder efficiënter en goedkoper kan maken dan de huidige situatie. Als case is de polder de Schermer onderzocht. Er is gekeken naar drie scenario's; volledige doorspoeling als in de huidige situatie, oftewel het referentiescenario, een scenario met wijziging van de doorspoelhoeveelheid en een scenario zonder doorspoelen. Tenslotte is een kosten-baten analyse gemaakt waarin de drie scenario's vergeleken zijn.

5.2 Landgebruik Schermer

5.2.1 Soorten gewassen en vee

Gegevens van het CBS laten een beeld zien van het landgebruik in de gehele Schermer. In Tabel 5.1 geeft de verdeling van de soorten vee.

Tabel 5.2 geeft de verdeling van gewassen, onderverdeeld in drie categorieën: akkerbouw, tuinbouw open grond en tuinbouw onder glas.

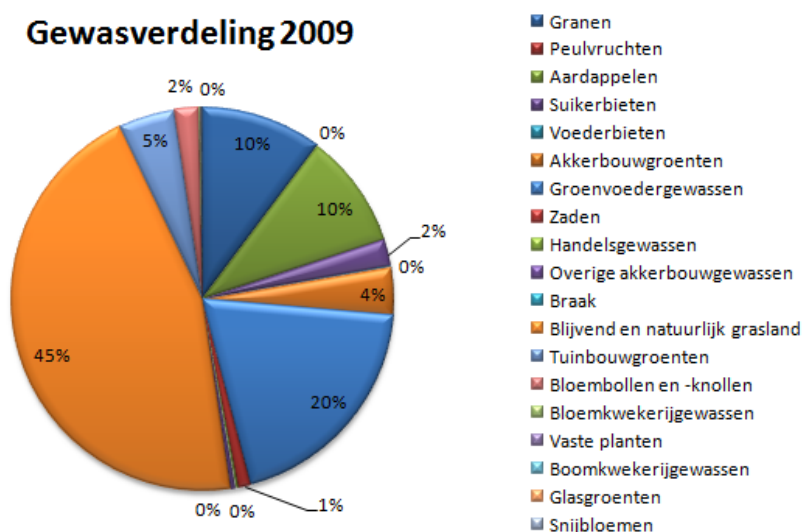
Tabel 5.1. Verdeling soorten vee in de Schermer in de jaren 2000, 2007, 2008 en 2009 (CBS)

| | Absolute aantallen | | | |
|-------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| Vee | 2000 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Paarden en pony's | 157 | 166 | 183 | 140 |
| Rundvee, totaal | 5960 | 6012 | 6336 | 6436 |
| Schapen | 11413 | 10269 | 8087 | 7105 |
| Geiten | 85 | 202 | 139 | 144 |
| Varkens, totaal | 321 | 2 | - | 4 |
| Kippen, totaal | 150253 | 82882 | 77270 | 81620 |

Tabel 5.2. Gewassen in de Schermer in de jaren 2000, 2007, 2008 en 2009 (CBS)

| Gewas | Waarde (in are) | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Akkerbouw | 2000 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Granen | 42635 | 44297 | 52312 | 49269 |
| Peulvruchten | 952 | 706 | 456 | 260 |
| Aardappelen | 49189 | 43638 | 46293 | 47190 |
| Suikerbieten | 25127 | 18475 | 11778 | 11072 |
| Voederbieten | 317 | 343 | 289 | 283 |
| Akkerbouwgroenten | 17630 | 16878 | 19021 | 19364 |
| Groenvoedergewassen | 30271 | 104987 | 94087 | 94747 |
| Zaden | 4875 | 5425 | 3945 | 5252 |
| Handelsgewassen | - | 390 | - | 918 |
| Overige akkerbouwgewassen | 1643 | 895 | 730 | 1975 |
| Braak | 4269 | 2226 | 628 | - |
| Blijvend en natuurlijk grasland | 278677 | 204764 | 222850 | 218981 |
| | Waarde (in are) | | | |
| Tuinbouw open grond | 2000 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Tuinbouwgroenten | 13622 | 22345 | 22693 | 22786 |
| Bloembollen en -knollen | 12806 | 7678 | 7921 | 9899 |
| Bloemkwekerijgewassen | 25 | 550 | 675 | 820 |
| Vaste planten | 817 | 84 | 230 | 355 |
| Boomkwekerijgewassen | 65 | 80 | 107 | 77 |
| | Waarde (in are) | | | |
| Tuinbouw onder glas | 2000 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Glasgroenten | 86,95 | 1,3 | 0,2 | 0,2 |
| Snijbloemen | 175 | 245 | 293 | 293 |
| Potplanten | 31 | 22,7 | - | - |
| Overige bloemen en sierplanten | 35,5 | 19 | - | - |
| Boomkwekerij en vaste planten | 5 | 5,5 | - | - |
| | Waarde (in 1000 stuks) | | | |
| | 2000 | 2007 | 2008 | 2009 |
| Tulpenbroei | 3500 | 6700 | 3900 | 17500 |

Gewasverdeling 2009

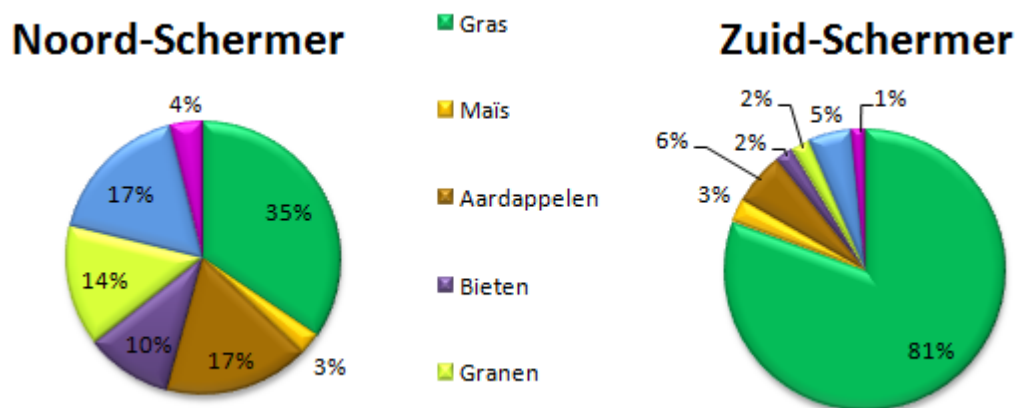


Figuur 5.1. Percentages per gewastype

Bovenstaande grafiek laat zien dat met 45% het grootste deel van het landbouwareaal in de Schermer wordt ingevuld door grasland. Dit grasland wordt voornamelijk gebruikt voor de

veeteelt. De groenvoedergewassen beslaan 20% van het oppervlak. Onder de categorie groenvoedergewassen vallen de gewassen klaver, luzerne en snijmaïs. In de Schermer gaat het, volgens de landbouwtellingen van het CBS uit 2000, vooral om snijmaïs. Dat betekent dat de categorie 'groenvoedergewassen' in dit geval dus als de categorie 'maïs' kan worden gezien. Andere grote categorieën zijn aardappelen, granen en tuin- en akkerbouwgroenten. Onder de laatste categorie vallen "de groenten die worden geteeld in de open grond en in afwisseling met ander tuin- of akkerbouwgewassen" (CBS, 2010). De groenten die in de Schermer, volgens de landbouwtellingen uit 2000, geteeld worden zijn voornamelijk kolen, sla, knolselderij, uien, broccoli en penen.

Binnen de Schermer is een onderverdeling te maken in het landgebruik tussen de Noord-Schermer en de Zuid-Schermer. Deze verdeling is te zien in Figuur 5.2. Figuur 5.2. Onderverdeling landgebruikstypen binnen de Schermer (LGN5).



Figuur 5.2. Onderverdeling landgebruikstypen binnen de Schermer (LGN5).

In de Noord-Schermer zijn de landgebruikstypen zeer verdeeld. Het grootste aandeel vormt het grasland (35%). Verder zijn de aardappelen, granen en bieten ook met redelijk percentages vertegenwoordigd (10 tot 17%). Zoals in het totaalbeeld van de Schermer al bleek vormen de groenten ook een grote categorie. Deze vallen onder de overige landbouwgewassen, die in de Noord-Schermer met 17% vertegenwoordigd zijn. De Zuid-Schermer toont een eenzijdiger beeld. Grasland/veeteelt vormt het overgrote deel van het landgebruik in dit deel van de Schermer. Naast het grasland worden ook aardappelen, groenten en maïs verbouwd (3 tot 6%).

De aanwezigheid van bepaalde gewassen heeft invloed op de maximale zouttolerantie van een gebied.

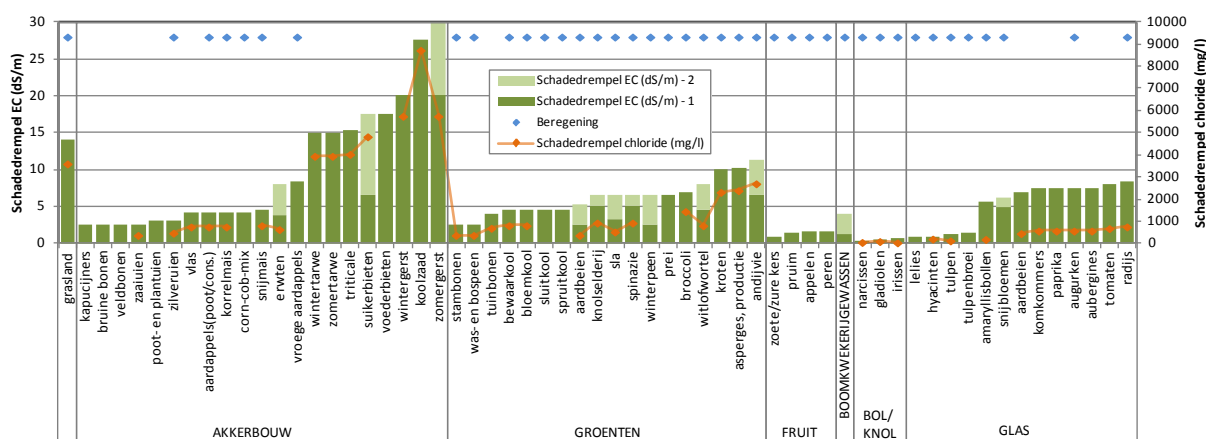
5.2.2 Zouttoleranties

Om de maximale zouttolerantie van de Schermer te kunnen bepalen zijn eerst de zouttoleranties van de afzonderlijke landgebruikstypen nodig. De totaal tabel van zouttolerantie per gewas is terug te vinden in onder andere van Dam et al (2007) en Roest et al (2003). Uit de laatste komt ook Tabel 5.3, die de zouttoleranties laat zien per gewasklasse. Het gaat in de tabel om beregeningswater. De tolerantie voor zout in bodemvocht ligt veel hoger dan dat van beregeningswater (van Dam et al 2007). In deze studie staat het oppervlaktewater centraal, waardoor er dus alleen gekeken is naar het beregeningswater.

Tabel 5.3. Zouttoleranties per gewastype voor gietwater (Roest et al, 2003)

| | Schadedrempel | Schadefunctie |
|--------------|---------------|--------------------------------|
| Gewas | mg Cl/l | % opbrengstderving per mg Cl/l |
| Aardappelen | 202 | 0.0610 |
| Gras | 962 | 0.0294 |
| Suikerbieten | 1288 | 0.0212 |
| Snijmaïs | 217 | 0.0343 |
| Granen | 1288 | 0.0218 |
| Fruitbomen | 171 | 0.0991 |
| Sierteelt | 101 | 0.7086 |
| Groenten | 245 | 0.0591 |
| Glastuinbouw | 356 | 0.0527 |
| Bloembollen | 41 | 0.0683 |

De tweede kolom van tabel 3 geeft de schadedrempel. Het geeft aan bij welke concentratie van chloride er schade aan het gewas gaat optreden. De derde kolom geeft aan hoeveel de opbrengst van dat gewas zal afnemen wanneer het chloridegehalte boven de schadedrempel komt.



Figuur 5.3. Schadedrempels van gewassen voor (Acacia Water, 2009).

Suikerbieten en granen hebben de hoogste zouttolerantie. Zij zijn dus het beste bestand tegen hoge chloridegehalten in het beregeningswater. Bloembollen hebben een erg lage zouttolerantie, wat dus betekent dat er al snel schade op zal treden als er beregend wordt met water met een hoog chloridegehalte. De tabel laat ook zien dat grasland een redelijk hoge zouttolerantie heeft. Omdat op dat grasland voornamelijk vee staat, is het belangrijk om ook de zouttoleranties van deze dieren te kennen.

Herkauwers, zoals koeien en schapen kunnen zich goed aanpassen aan langdurige hogere opname van zout. Er is hierin wel een verschil tussen verschillende categorieën herkauwers. Aangenomen wordt dat melkvee de laagste zouttolerantie heeft van alle categorieën herkauwers, en schapen en vleeskoeien de hoogste tolerantie. Melkvee heeft een lagere tolerantie vanwege de hoge behoefte aan vocht. Voor lacterend melkvee wordt een maximum van 1820 mg Cl/l aangeraden. Boven een concentratie van 4854 mg Cl/l wordt de situatie voor melkvee problematisch. (Acacia Water, 2009)

Cijfers van LTO Noord bevestigen dat herkauwers inderdaad goed bestand zijn tegen zout in hun drinkwater. Zij houden voor herkauwers een maximum van 2000 mg Cl/l aan. Hierboven zal er schade op gaan treden (LTO Schapenhouderij, 2009).

Er moet nog wel opgemerkt worden dat concentraties onder de 2000 mg ook al effecten hebben. Dit heeft te maken met de drinkhoeveelheid. Door opname van zout drinkwater wordt namelijk de vochtbehoefte hoger. Hoe zouter het water, hoe meer er gedronken wordt. Dit is echter dus nog niet schadelijk. Pas boven de 2000 mg Cl/l begint er schade op te treden.

De gezondheidsdienst voor dieren (GD) heeft ook een onderzoek gedaan naar veedrinkwater. Hieruit komen de volgende cijfers voor het chloridegehalte van vee naar voren:

Tabel 5.4. zouttolerantie vee (GD, 2010)

| | Herkauwers | | Varkens en Paarden | | Pluimvee | |
|-----------------|------------|-----------|--------------------|-----------|----------|-----------|
| | Goed | Afwijkend | Goed | Afwijkend | Goed | Afwijkend |
| Chloride (mg/l) | <250 | >2000 | <250 | >1000 | <200 | >250 |

Deze cijfers worden ook gebruikt in het rapport "Leven met Zout Water, Deelrapport: Zouttolerantie van zoetwater afhankelijke natuurdoeltypen; verkenning en kennislacunes" (Paulissen et al, 2007). We zullen dus gebruik maken van deze cijfers om de maximale zoutconcentratie in het oppervlaktewater te bepalen.

5.3 Huidige situatie

In de huidige situatie wordt de polder volledig doorgespoeld (de doorspoelhoeveelheid is in dit scenario dus 100%). In droge periodes kan er een situatie van watertekort optreden. De vraag rijst dan of er zuiniger omgegaan kan worden met het water. In dit hoofdstuk zal gekeken worden naar de vraag hoe efficiënt de huidige situatie is. Hierbij moet gekeken worden naar het daadwerkelijke gebruik van water en naar de huidige waterkwaliteit en doorspoeling.

5.3.1 Watergebruik en berekening

Een groot deel van de Schermer bestaat uit grasland voor veeteelt. Dit hoeft niet berekend te worden en de waterbehoefte richt zich dan dus op de benodigdheden van het vee dat op dit grasland staat (rundvee, schapen en paarden). Zij gebruiken het water uit de sloten als drinkwater. Het is dus belangrijk om te weten te komen hoeveel de totale veestapel in de Noord- en Zuid-Schermer verbruikt.

Er zijn verschillende cijfers bekend over de vochtbehoefte van vee. Uit ASG (1998) blijken de volgende cijfers over rundvee:

Tabel 5.5. Vochtbehoefte Rundvee (ASG, 1998)

| | Vochtbehoefte l/dag |
|---------------------|---------------------|
| Jongvee tot 1 jaar | 5-30 |
| Jongvee tot 2 jaar | 35-55 |
| Droogstaand melkvee | 35-60 |
| 10 kg melk per dag | 35-60 |
| 20 kg melk per dag | 70-100 |
| 30 kg melk per dag | 90-140 |
| 40 kg melk per dag | 100 - 160 |

Uit de praktijk blijkt dat voor een melkgift van 30 liter, een koe ongeveer 120 liter vocht nodig heeft. Dit klopt grotendeels met de cijfers uit Tabel 5.5, daarom zullen de cijfers uit de tabel aangehouden worden om de vochtbehoefte van rundvee te berekenen. Uit de landbouwtellingen van het CBS, zijn de aantallen van verschillende soorten koeien bekend

voor het jaar 2000. Er wordt vanuit gegaan dat de verhouding tussen de hoeveelheid koeien van verschillende leeftijden hetzelfde blijft. Zo kan dus de vochtbehoefte opgesplitst worden in leeftijden en wordt een vollediger beeld van de vochtbehoefte bepaald.

Tabel 5.6 bevat in de tweede kolom de landbouwtellingen uit 2000. De derde kolom bevat de berekende aantallen van 2009. Deze zijn berekend door dezelfde verhouding aan te houden als in 2000. De cijfers in de vierde kolom zijn gemiddelden, berekend uit Tabel 5.5. Er is voor de categorie 'melk- en kalfkoeien' uitgegaan van een gemiddelde melkproductie tussen de 20 en 30 kg per dag. Voor 'vlees- en weidevee' ouder dan 2 wordt de waterbehoefte van droogstaand melkvee aangehouden. Kolom 5 geeft tenslotte de totale waterbehoefte aan. De totale vochtbehoefte van de koeien in de Schermer is dus 470.302,5 liter vocht per dag.

Andere dieren die in de Schermer gehouden worden zijn schapen en paarden. Ook zij hebben een specifieke waterbehoefte. Geiten en schapen drinken gemiddeld ongeveer 4 liter per dag. (PIRSA, 2008 en Lenntech, 2009). Er zijn in totaal 7.249 geiten en schapen in de Schermer, wat dus een vochtbehoefte van ongeveer 28.996 liter per dag betekent.

Tabel 5.6. Vochtbehoefte koeien (eigen berekeningen)

| | Absolute aantallen 2000 (CBS) | Berekende aantallen 2009 | Waterbehoefte per dier (l/dag) (ASG, 1998) | Totale waterbehoefte (l/dag) |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| Melkkoeien | | | | |
| Vee jonger dan 1 jaar | 1.006 | 1.188 | 20 | 23.760 |
| Vee van 1 tot 2 jaar | 1.075 | 1.270 | 45 | 57.150 |
| Melk- en kalfkoeien | 3.027 | 3.575 | 105 | 37.5375 |
| Vlees- en weidevee | | | | |
| Vee jonger dan 1 jaar | 146 | 172 | 20 | 3.440 |
| Vee van 1 tot 2 jaar | 134 | 158 | 45 | 7.110 |
| Vee van 2 jaar en ouder | 62 | 73 | 47,5 | 3.467,5 |

Paarden en pony's hebben volgens de gezondheidsdienst voor dieren een vochtbehoefte van ongeveer 50 ml per kg per dag als het in geen inspanning levert. Als een paard inspanning gaat leveren zal deze vochtbehoefte verdubbelen, dus naar 100 ml per kg per dag (GD, 2008). We zullen voor de totale vochtbehoefte uitgaan van het gemiddelde, dus 75 ml per kg per dag. Een gemiddeld paard weegt ongeveer 500 kg, wat dus een vochtbehoefte van 37,5 liter oplevert. Er zijn in de Schermer 140 paarden, wat dus een totale vochtbehoefte van 5.250 liter inhoudt.

De totale veestapel heeft dus 504.548,5 liter per dag nodig, dat is 505,55 m³/dag. Uit 5.2 bleek al de verdeling tussen de Noord-Schermer en de Zuid-Schermer. In de Noord-Schermer bevindt zich 39,31% van het grasland en in de Zuid-Schermer 60,69%. In de Noord-Schermer gebruikt het vee dus 198,52 m³/dag, en in de Zuid-Schermer 306,48 m³/dag. Bij deze vochtbehoefte moet nog wel opgemerkt worden dat de dieren een deel van hun vochtbehoefte uit het voer halen (bijvoorbeeld uit gras). De totale hoeveelheid drinkwater is dus lager dan de vochtbehoefte van de dieren.

Naast het gebruik voor veedrenking, wordt het oppervlaktewater gebruikt voor beregening. In

Tabel 5.7 een selectie uit van Dam et al 2007 (zie ook Figuur 5.3). Hierin staat of er beregent wordt, en zo ja wanneer.

Tabel 5.7. Beregening gewassen (van Dam et al, 2007)

| gewas(groep) landbouwtelling | komt beregening met oppervlaktewater voor? | begin beregeningsseizoen (weeknr) | eind beregeningsseizoen (weeknr) |
|-------------------------------------|--|---|--|
| Akkerbouw | | | |
| Maïs | Incidenteel droogte bij bloei | 29 | 31 |
| Aardappelen | Standaard tegen schurft | 22 | 31 |
| Bieten | Nee | | |
| Granen | Nee | | |
| Bollen | | | |
| Narcissen | ja | 14 | 23 |
| Krokussen | incidenteel | 14 | 22 |
| Irissen | ja | 14 | 23 |
| Hyacinten | incidenteel | 14 | 23 |
| Tulpen | ja | 14 | 23 |
| Overige landbouwgewassen | | | |
| Bewaarkool | incidenteel | | |
| Broccoli | ja | 26 | 39 |
| Erwten | nee | | |
| Knolselderij | ja, bij uitplanten + incidenteel | 19 | 20 |
| Sla | ja | 11 | 36 |
| Sluitkool | ja, bij uitplanten + incidenteel | | |
| Spruitkool | ja, bij uitplanten + incidenteel | 15 | 33 |
| Uien | nee | | |
| Was- en bospeen | ja, bij droogte tot opkomst | 7 | 21 |
| Winterpeen | incidenteel tot opkomst | 19 | 22 |
| Witlofwortel | ja, bij droogte tot opkomst | 19 | 20 |

In praktijk blijkt echter dat er korter beregend wordt dan in de bovenstaande tabel weergegeven wordt. Sommige gewassen maar enkele dagen of worden zelfs helemaal niet beregend. Een voorbeeld hiervan zijn aardappelen. Er geldt sinds 2005 een verbod op het beregenen van (poot)aardappelen met oppervlaktewater (Ministerie LNV, 2010). Ook voor veel andere akkerbouwgewassen (zoals verschillende kolen) blijkt dat er in praktijk minder beregend wordt. Boeren geven aan dat zij het liefst zo min mogelijk beregenen. Als reden hiervoor wordt aangegeven dat beregening bij veel gewassen niet opbrengstverhogend werkt en soms zelfs waterschade kan veroorzaken.

Andere gewassen als bloembollen, knolselderij en sla worden normaliter wel beregend. De beregening vindt echter niet het gehele beregeningsseizoen. De beregening vindt bijvoorbeeld om de paar dagen plaats. De volgende gegevens zijn afkomstig uit interviews met agrariërs in het gebied waarvoor onder andere het waterverbruik is geïnventariseerd. Een voorbeeld is de bloembollenteelt. In de praktijk is door een bollenteler aangegeven dat hij in de beregeningsperiode 10 keer ook daadwerkelijk beregend. Een deel van de vochtanvoer wordt namelijk geregeld via water dat via drains ondergronds wordt aangevoerd waardoor het gewas in het voorjaar en in de zomer potentieel kan verdampen. De bollen worden dus 10 keer in het jaar beregend. Dit gebeurt iedere keer met 15 mm op een oppervlakte van 10 ha. Wat dus betekent dat

bollen 1.500 m³/ha per jaar verbruiken aan beregeningswater. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de bollen dus ook het water gebruiken dat ingebracht is in de grond. Het totale verbruik van oppervlaktewater ligt dus hoger.

Een ander voorbeeld zijn groenten, zoals sla, broccoli en knolselderij. Praktijkcijfers zijn opnieuw afkomstig van de agrariërs uit dit gebied. Sla wordt in een periode van mei t/m augustus (dus niet vanaf week 11) 3 keer per week beregend, met 350 m³ per keer (bij een oppervlakte van 42 ha). Dit betekent dat sla per jaar ongeveer 400 m³/ha water verbruikt. Broccoli wordt 2 keer per jaar beregend met 20 tot 25 mm/ha. Dit betekent een totaal van 450 m³ per ha in een jaar. Knolselderij wordt in met 500 m³/ha per jaar beregend. Er kan dus gezegd worden dat de groenten die beregend worden tussen de 400 en 500 m³/ha per jaar verbruiken.

Veel boeren geven aan te beregenen "op gevoel". Dit maakt het moeilijk om een totaal verbruik te bepalen. Wel kan er geconcludeerd worden dat er wordt in praktijk dus korter beregend wordt dan op basis van de literatuur zou worden verondersteld. De precieze hoeveelheid beregening is dus moeilijk te bepalen, ook omdat deze zeer afhankelijk is van de weersomstandigheden.

5.3.2 Kwaliteit

In het waterbeheersplan 2010-2015 uit 2009 geeft het HHNK haar doelstellingen voor die periode aan. In dit plan beschrijft het HHNK de maximale concentratie dat het oppervlaktewater mag hebben. Deze is te vinden in Tabel 5.8.

Tabel 5.8. Geschiktheid landbouw (HHNK, 2009)

| Landbouwfunctie | Gewenste maximum concentratie chloride in oppervlaktewater (in mg/l) |
|--------------------|--|
| Bollen | < 300 |
| Tuinbouw | < 300 |
| Akkerbouw | < 600 |
| Grasland/veeteelt | < 2000 |
| Marginaal grasland | >2000 |

Om deze waarden te handhaven wordt de polder doorgespoeld. Tabel 9 laat de maandelijkse gemiddelde doorspoelhoeveelheden in m³/dag zien op basis van waterbalansberekeningen (Acacia Water, 2009). Tabel 5.9 geeft de cijfers voor een gemiddeld jaar zien. Tabel 5.10 laat de cijfers voor droge jaar 2003 zien.

Door deze doorspoelhoeveelheden zorgt het waterschap ervoor dat het chloridegehalte van het oppervlaktewater onder de gestelde normering blijft. Met deze doorspoelhoeveelheden is het gemiddelde chloridegehalte in de Zuid-Schermer rond 1.500 g/m³ en in de Noord-Schermer rond 200 g/m³ (Acacia Water, 2009).

Tabel 5.9. Gemiddelde berekende Doorspoelhoeveelheden in m³/d (Acacia Water, 2009)

| Maand | Noord-Schermer | Zuid-Schermer |
|-----------|----------------|---------------|
| Januari | 0 | 0 |
| Februari | 0 | 0 |
| Maart | 0 | 0 |
| April | 15.000 | 15.000 |
| Mei | 20.000 | 15.000 |
| Juni | 20.000 | 18.000 |
| Juli | 22.000 | 20.000 |
| Augustus | 20.000 | 21.000 |
| September | 20.000 | 18.000 |
| Oktober | 10.000 | 10.000 |
| November | 0 | 0 |
| December | 0 | 0 |

Tabel 5.10. Gemiddelde berekende doorspoelhoeveelheden 2003, in m³/d (Acacia Water, 2009)

| Maand | Noord-Schermer | Zuid-Schermer |
|-----------|----------------|---------------|
| Januari | 0 | 0 |
| Februari | 10.000 | 20.000 |
| Maart | 20.000 | 24.000 |
| April | 38.000 | 35.000 |
| Mei | 32.000 | 43.000 |
| Juni | 29.000 | 40.000 |
| Juli | 31.000 | 40.000 |
| Augustus | 30.000 | 41.000 |
| September | 35.000 | 42.000 |
| Oktober | 32.000 | 32.000 |
| November | 25.000 | 23.000 |
| December | 0 | 0 |

5.3.3 Kosten in- en uitlaat

De kosten voor het inlaten van water zijn moeilijk te bepalen (HHNK, 2010). De reden hiervoor is dat de waarde van het water moeilijk is te definiëren. In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat tijdens drogere periodes er waterschaarste kan optreden. Als dat gebeurt is het in feite een kwestie van vraag en aanbod en kan aan het water een hogere waarde worden toegekend. De verdringingsreeks van het HHNK (

Tabel 5.11) laat de verdeling van water tijdens periodes met droogte zien. Het water wordt dan verdeeld in volgorde van belangrijkheid van de gebruiksfuncties van water (HHNK, 2007). In perioden van droogte betekent dit dat een deel van de gebruiksfuncties niet of onvoldoende beschikken over zoet water. Er is dan sprake van een watertekort met het gevolg dat er schade op kan treden. Deze opgetreden schade zou dan de waarde van het water kunnen vertegenwoordigen.

De cijfers in

Tabel 5.11 geven de benodigde hoeveelheden water aan bij droogte. De cijfers uit 2003 zijn als referentie gebruikt. Het gaat hierom cijfers uit het gehele HHNK gebied.

Tabel 5.11. Verdringingsreek (HHNK, 2007)

| | Watertekortstudie (gegevens uit 2003) in m ³ /s | HHNK |
|--|---|------|
| 1 Veiligheid en voorkomen van onomkeerbare schade | 7.4 | |
| 1.1 Peilhandhaving hoofdsysteem t.b.v. veiligheid waterkeringen | 4.4 | |
| 1.2 Peilhandhaving veengebieden t.b.v. klink en zettingen | 3.0 | |
| 1.3 Peilhandhaving en doorspoelen t.b.v. kwetsbare natuur | | |
| 2 Nutsvoorzieningen | 4.9 | |
| 2.1 Onttrekken en doorspoelen t.b.v. drinkwatervoorziening | 4.0 | |
| 2.2 Doorspoelen t.b.v. koelwater van elektriciteitscentrales | 0.9 | |
| 3 Kleinschalig hoogwaardig gebruik | 1.4 | |
| 3.1 Doorspoeling t.b.v. volksgezondheid (botulisme, blauwalgen) | | |
| 3.2 Onttrekking proceswater industrie | | |
| 3.3 Doorspoeling oppervlaktewater waaruit proceswater wordt onttrokken | | |
| 3.4 Berekening van de van 4.1 uitgezonderde kapitaalintensieve teelten | 1.4 | |
| 4 Overige functies | 24.4 | |
| 4.1 Berekening akker- en tuinbouwgewassen, sportvelden en greens | 3.2 | |
| 4.2 Doorspoeling t.b.v. berekening van akker- en tuinbouwgebieden | 15.6 | |
| 4.3 Peilhandhaving klei- en zandgebieden | 5.6 | |
| 4.4 Peilhandhaving en doorspoeling van niet-kwetsbaar natuurgebied | | |
| 4.5 Berekening gras/maïs | | |
| 4.6 Peilopzetten en -handhaven veenkoloniaal gebied | | |
| 4.7 Afvoer voor visintrek | | |
| 4.8 Doorspoeling tegen botulisme en blauwalgen | | |
| 4.9 Doorspoeling elektriciteitscentrale Noord-Bergum en zouttong Nzk | | |
| 4.10 Zuinig aan doen met schutten op buitenwater | | |
| Totaal | 38.1 | |

Er zijn tijdens het droge jaar 2003, doordat er voldoende water vanuit het IJsselmeer werd gehaald om door te spoelen, waardoor er uiteindelijk geen grote tekorten optraden (ten Voorde, 2004). Doordat er dus geen grote tekorten optraden zou op basis van de voorgaande beredenering worden aangenomen dat de kosten van de inlaat nihil zijn.

De kosten voor de uitlaat kan wel berekend worden. De gemalen pompen het water uit de polder. Bij het pompen verbruiken de gemalen stroom. De energiekosten zullen daarom als kosten voor de uitlaat van het water gelden. De uitlaat van de Schermer wordt verzorgd door twee gemalen: Willem-Alexander voor de Zuid-Schermer en Beatrix voor de Noord-Schermer. Cijfers van het HHNK over het energieverbruik in hun gehele gebied laten de volgende kosten voor de uitlaat zien (Tabel 5.12).

Tabel 5.12. Energie kosten en verbruik (HHNK, 2009)

| Gemaal | totaal levering en transport incl. BTW per jaar | verbruik totaal kWh | Kosten per kWh incl. BTW |
|------------------|---|---------------------|--------------------------|
| Willem Alexander | 47.847,36 | 346456 | 0,138 |
| Beatrix | 59.295,52 | 432218 | 0,137 |
| Totaal | 107.142,88 | 778674 | |

De totale kosten voor de uitlaat zijn bij een normale doorspoelhoeveelheid dus €107.142,88 per jaar. Om te bepalen hoe efficiënt de huidige situatie is zal de doorspoelhoeveelheid vergeleken moeten worden met het verbruik.

In 5.3 was al te zien dat de veestapel maximaal 505 m³/dag nodig heeft. De vochtbehoefte is als volgt onderverdeeld: 198,52 m³/dag voor de Noord-Schermer, en 306,48 m³/dag voor de Zuid-Schermer. De groenten hebben gemiddeld 450 m³/ha/jaar nodig. Het beregeningsseizoen duurt maximaal 4 maanden, dus 112 dagen. In totaal is er 421,50 ha aan groenteteelt in de Schermer (zie

Tabel 5.2). Dit betekent een verbruik van ongeveer 1.700 m³/dag. 83,98% van de groenten worden geteeld in de Noord-Schermer, wat gelijk staat aan ongeveer 1.427,66 m³/dag. Voor de Zuid-Schermer betekent dat een verbruik van 272,34 m³/dag. De bollen hebben gemiddeld 1.500 m³/ha/jaar nodig. Het beregeningsseizoen duurt maximaal 2 maanden, dus 56 dagen. In totaal is er 99 ha aan bollenteelt in de Schermer (zie

Tabel 5.2). Dit betekent een verbruik van ongeveer 2.700 m³/dag. Van het totaal aantal hectare bollenteelt ligt 79,83% in de Noord-Schermer, en 20,17% in de Zuid-Schermer. Dit betekent een vochtbehoefte in m³ per dag in de Noord-Schermer van 2.155,41 en in de Zuid-Schermer van 544,59.

De totale hoeveelheid benodigd oppervlakte water ligt op ongeveer 5.000 m³/dag. Om per deel van de Schermer de efficiëntie te bepalen, moet er gekeken worden naar het totale verbruik per deelgebied van de Schermer. De vochtbehoefte voor de Noord-Schermer is dan ongeveer 3.800 m³/dag, en voor de Zuid-Schermer 1.200 m³/dag.

De doorspoelhoeveelheid, zoals bleek uit Tabel 5.9 zijn verschillend voor de Noord- en Zuid-Schermer. Voor de Noord-Schermer is dat tijdens het groeiseizoen ongeveer 20.000 m³/dag, en voor de Zuid-Schermer is dat ongeveer 18.000 m³/dag. In de Noord-Schermer wordt dus maar 19% (3.800 m³ van de 20.000 m³) van het doorgespoelde hoeveelheid water gebruikt, en in de Zuid-Schermer maar 6,67% (1.200 m³ van de 18.000 m³). Bij deze berekening moeten nog een aantal aspecten opgemerkt worden:

- De hoeveelheid vocht uit voedsel moet in mindering gebracht worden van de totale vochtbehoefte van vee.
- Het gebruik van de bollenteelt moet nog vergroot worden met de hoeveelheid die de bollen gebruiken van het geïnfiltrerde oppervlaktewater.
- De eventuele berekening van overige gewassen moet nog opgeteld worden bij het totaal. Hierbij horen bijvoorbeeld het de extra berekening dat boeren "op gevoel" doen, en de kleine hoeveelheden berekening tijdens zeer droge perioden van gewassen die nu als niet-beregend zijn beschouwd.

Ondank deze opmerkingen blijkt dat er veel meer water door de polder heen wordt gespoeld dan dat er eigenlijk gebruikt wordt. Een beperking van inlaat lijkt daarmee mogelijk.

5.4 Wijziging doorspoelhoeveelheid

Met een wijziging van de doorspoelhoeveelheid wordt er minder water de polder ingelaten. Dit betekent dat het oppervlaktewater in de polder zouter zal worden. Dit kan schade van de gewassen leiden. Daarom is het belangrijk om de zouttoleranties van de landbouw in acht te nemen, en als uitgangspunt te nemen om de doorspoelhoeveelheid te bepalen die minder is dan de huidige situatie, maar ook geen zoutschade aan zal richten.

5.4.1 Maximale zouttoleranties

Zoals Tabel 5.3 en Tabel 5.4 al lieten zien hebben gewassen en diersoorten verschillende zouttoleranties. Om de maximale zouttoleranties waarbij geen schade optreedt te bepalen, zal gekeken moeten worden naar de schadedrempels. Er zal onderscheid gemaakt worden tussen de Noord-Schermer en de Zuid-Schermer, vanwege de verschillen in landgebruik.

In de Noord-Schermer vormen het grasland, de aardappelen, de granen, de groenten en de bieten 93% van het landgebruik. Deze zijn dus het belangrijkste in dit deel van de Schermer. De tabellen uit hoofdstuk 2.2 laten zien dat van deze landgebruikstypen granen en bieten de hoogste tolerantie hebben (1288 mg Cl/l), en aardappelen de laagste zouttolerantie (202 mg Cl/l). Bollenteelt, wat ook aanwezig is in de Noord-Schermer, hebben een zeer lage zouttolerantie. De cijfers van Roest, et al (2003) geven een tolerantie van maar 41 mg Cl/l aan. Het HHNK houdt echter iets andere cijfers aan, zoals al te zien was in tabel 8, uit hoofdstuk 3.2. Het HHNK houdt voor akkerbouw een

maximum aan van 600 mg Cl/l. Voor groenten houdt het HHNK een maximum van 300 mg Cl/l.

In de Zuid-Schermer zijn vooral gras, aardappelen, groenten en maïs aanwezig. Ook in deze situatie hebben de aardappelen de laagste zouttolerantie. De tolerantie van vee is in dit gebied zeer belangrijk door de aanwezigheid van grasland. In 5.2 bleek al dat van de herkauwers het lactierend melkvee de laagste schadedrempel heeft, van 1820 mg Cl/l. Voor varkens en paarden geldt een maximum van 1000 mg Cl/l.

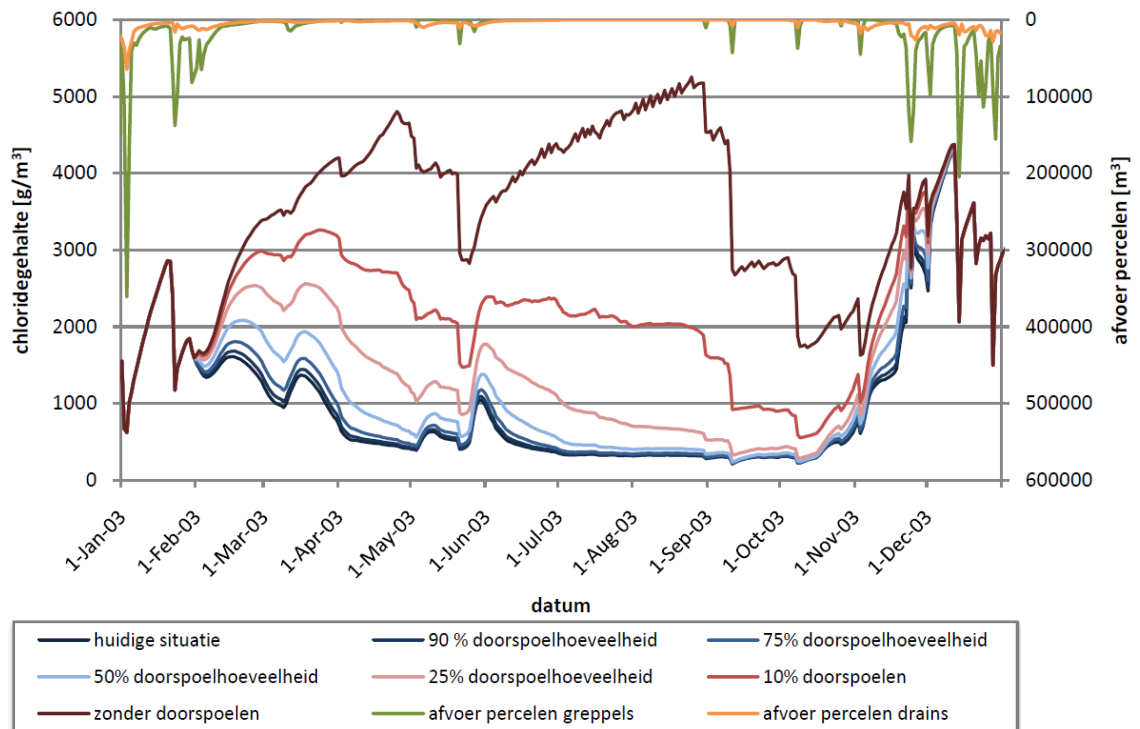
Voor het bepalen van de minimale waterkwaliteit zullen de waarden van het HHNK aangehouden worden, aanzien dat ook nu al het geval is. Dat wil dus zeggen voor grasland een maximum van 2000 mg Cl/l, voor akkerbouw een maximum van 600 mg Cl/l, en voor bollen en andere gevoelige teelten een maximum van 300 mg Cl/l.

5.4.2 Minimale waterkwaliteit

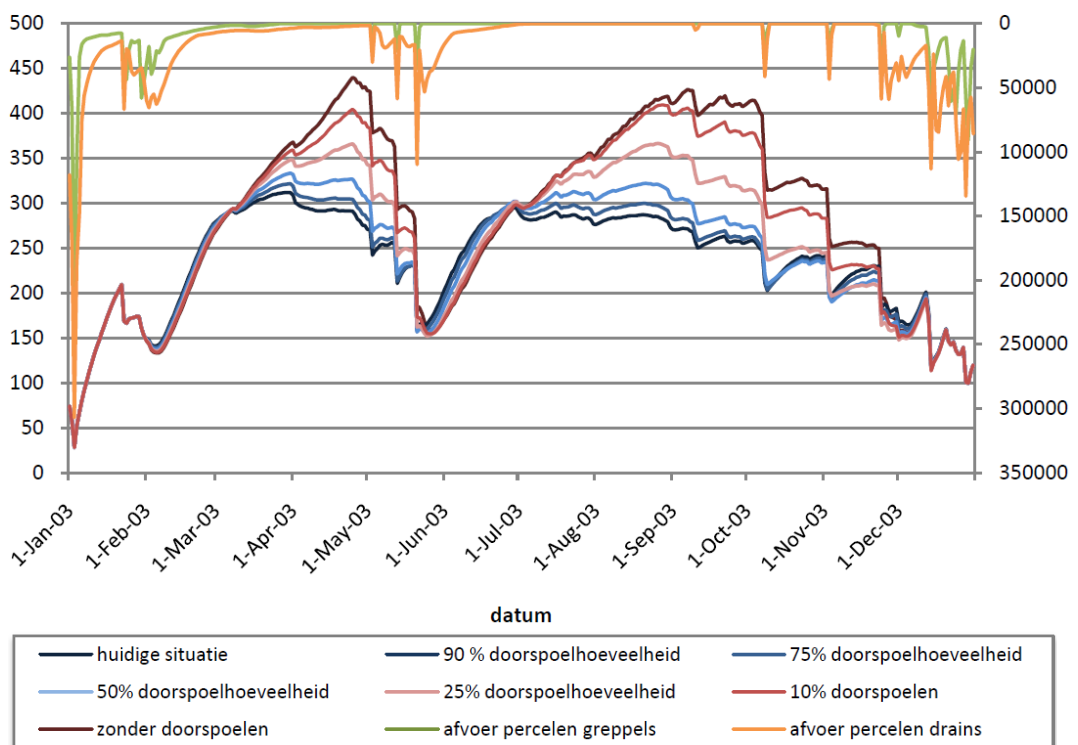
Om de gewijzigde doorspoelhoeveelheid te kunnen bepalen is het nodig om te bekijken wat verschillende doorspoelhoeveelheden doen met de waterkwaliteit en welke schade aan de landbouw deze kwaliteit met zich mee brengt. In een droog jaar zal, onder andere door een verdampingsoverschot, het oppervlaktewater een hogere chlorideconcentratie hebben dan in een gemiddeld jaar. Er zal daarom bij de wijziging van de doorspoelhoeveelheid gekeken worden naar een droog jaar (2003).

In de waterbalansstudie van de Schermer (hoofdstuk 4) is het effect van verschillende doorspoelhoeveelheden op het chloridegehalte van het oppervlaktewater berekend. Figuur 5.4 geeft de situatie van de Zuid-Schermer. Het valt op dat de lijnen van 100%, 90%, 75% en 50% in het groeiseizoen (april - september) erg dicht bij elkaar liggen. Dit betekent dat het chloridegehalte dus niet veel zal stijgen bij minder doorspoelen. De lijn van 100% doorspoelen ligt, in het groeiseizoen, ongeveer op de 450 mg Cl/l. De lijn van 50% doorspoelen ligt ongeveer op een chlorideconcentratie van 575 mg/l. Dit betekent dat alleen de bollen schade zullen ondervinden van de wijziging van de doorspoelhoeveelheid. Echter, maar 1% van al het oppervlak in de Zuid-Schermer bestaat uit bollenteelt, waardoor de totale schade van de polder mee zal vallen.

Figuur 5.5 laat de situatie van de Noord-Schermer zien. De lijn van 100% doorspoelen ligt onder de 300 mg Cl/l. De lijn van 75% doorspoelen ongeveer op 300 mg Cl/l. De lijn van 50% doorspoelen ligt op ongeveer 325 mg Cl/l. Ook hier betekent een doorspoelhoeveelheid alleen een overschrijding van de HHNK-norm voor bollen.



Figuur 5.4. Chloridegehalte oppervlaktewater bij verschillende doorspoelhoeveelheden in de Zuid-Schermer, 2003



Figuur 5.5. Chloridegehalte oppervlaktewater bij verschillende doorspoelhoeveelheden in de Noord-Schermer.

Bij de wijziging van de doorspoelhoeveelheid moet wel worden opgemerkt dat binnen de polders (dus ook binnen de Noord- en de Zuid-Schermer) verschillende normen gehandhaafd kunnen worden. De hierboven berekende doorspoelhoeveelheden hebben betrekking op de gehele deelgebieden, de Noord- of Zuid-Schermer. Binnen een polder kan echter het verminderde water verdeeld worden. Grasland heeft bijvoorbeeld een hogere tolerantie dan het niveau wat bereikt wordt bij een doorspoelhoeveelheid van 50%. Er kan dan bijvoorbeeld besloten worden de sloten bij grasland nog minder door te

spoelen dan de 50% van hierboven, en de sloten rondom bollenvelden meer door te spoelen dan 50%. De totale hoeveelheid doorgespoeld water van het deelgebied wordt dan wel verminderd, maar door verdeling van het water treedt er toch zo weinig mogelijk schade op.

5.4.3 Kosten in- en uitlaat

De kosten voor de inlaat blijven gelijk als voor een situatie met 100% doorspoelhoeveelheid. Dit komt doordat er geen sprake is van een watertekort (kwalitatief en kwantitatief), ondanks dat er minder doorgespoeld wordt. De kosten voor de uitlaat zullen wel dalen. Als er minder wordt doorgespoeld zullen de energiekosten van het gemaal ook dalen, er moet tenslotte minder uitgeslagen worden.

Een situatie met een vermindering van doorspoelhoeveelheid levert een efficiëntere situatie op. Er wordt een hoger percentage van het doorgespoelde water gebruikt, terwijl de kwaliteit niet onder een bepaalde grens komt. Bij een situatie met een wijziging van doorspoelhoeveelheid komt het chloridegehalte van het oppervlaktewater wel dichterbij de grenswaarde, dan bij volledige doorspoeling. Sommige gewassen zullen dan meer risico lopen op schade (zoals de bollenteelt). Er zal bij de doorspoeling dus rekening gehouden moeten worden met een goede verdeling van het water in tijd en ruimte. Alleen dan zal de schade zo klein mogelijk uitvallen.

Bij de berekening van de kosten zal er in een situatie van een doorspoelhoeveelheid van 50% vanuit worden gegaan dat er geen schade op zal treden.

5.5 Niet doorspoelen

Als een polder helemaal niet meer doorgespoeld zou worden, zal het oppervlaktewater een stuk zouter worden. Dit zal betekenen dat er schade op zal treden in de landbouw. Om deze schade te voorkomen zouden er, om dezelfde gebruiksfuncties te faciliteren, alternatieven vormen van wateraanvoer moeten zijn.

5.5.1 Kwaliteit water

Er kan in deze situatie dus geen gebruik meer gemaakt worden van het oppervlakte water, zonder schade op te lopen. Zoals in de Figuur 5.4 en Figuur 5.5 te zien is, zal in de Zuid-Schermer het chloridegehalte in het groeiseizoen stijgen tot boven de 4000 mg/l. In de Noord-Schermer zal het chloride stijgen tot boven de 350, of sommige periodes zelfs boven de 400 mg/l. Deze chloridegehalten zullen zorgen voor schade aan de gewassen die berekend worden, dus de groenten en bollen.

5.5.2 Schade aan gewassen en vee

Tabel 5.3 liet al zien waar de schadedrempels van de gewassen liggen. Nu zal gekeken worden naar de schadefunctie, die nogmaals in

Tabel 5.13 vermeld staat. In de derde en vierde kolom staan de percentages van de totale opbrengstderving. Als het chloridegehalte stijgt naar 400 mg/l voor de Noord-Schermer, en 4000 mg cl/l voor de Zuid-Schermer zal het chloridegehalte zo hoog worden dat beregenen met oppervlaktewater veel schade op zal leveren.

Tabel 5.13. Schadedrempel en schadefunctie per gewasklasse

| | Schadefunctie | Noord-Schermer | Zuid-Schermer |
|--------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Gewas | % opbrengstderving per mg Cl/l | Totale opbrengstderving | Totale opbrengstderving |
| Aardappelen | 0.0610 | n.v.t. | n.v.t. |
| Bieten | 0.0212 | n.v.t. | n.v.t. |
| Maïs | 0.0343 | n.v.t. | n.v.t. |
| Granen | 0.0218 | n.v.t. | n.v.t. |
| Groenten | 0.0527 | 9,16% | 100% |
| Bloembollen | 0.0683 | 24,52% | 100% |

De schade wordt dus gevormd door de opbrengstvermindering van de groenten en de bloembollen. De overige gewassen worden nauwelijks berekend en er zal dus aangenomen worden dat er geen schade optreedt bij verzilting van het oppervlaktewater. Om de totale schade te berekenen zijn de opbrengsten van de gewassen nodig.

Voor 2009 zijn bij het CBS de totale ha per gewastype niet bekend, alleen de categorieën 'groenten' en 'bloembollen' worden onderscheiden, en dus geen onderverdeling in gewassen. De precieze kosten zijn daardoor moeilijk te bepalen. Om toch een indicatie te krijgen van de schade zullen gemiddelden opbrengsten voor de groenten en de bloembollen genomen worden, zoals vermeld in Tabel 5.14.

De opbrengst van de groenten is dus gemiddeld 5.850 euro per ha. Er is in totaal 421,5 hectare aan groenten. Hiervan ligt 353,98 ha in de Noord-Schermer, en 67,52 ha in de Zuid-Schermer. De totale opbrengst in de Noord-Schermer is dan dus 2.070.783 euro, en in de Zuid-Schermer 394.992 euro.

De opbrengst van de bloembollen is dus gemiddeld 21.350 euro per ha. Er is in totaal 99 hectare aan bollenteelt. Hiervan ligt 79,03 ha in de Noord-Schermer, en 19,97 ha in de Zuid-Schermer. De totale opbrengst in de Noord-Schermer is dan dus 1.687.291 euro, en in de Zuid-Schermer 426.360 euro.

Tabel 5.14. Bruto standaard saldi per gewastypen (LEI & CBS, 2009)

| Gewas | Bss in euro per ha. 2007 |
|--------------------|--------------------------|
| Groenten | |
| Uien | 3.240 |
| Spruitkool | 4.030 |
| Sla | 12.100* |
| Knolselderij | 1.910 |
| Broccoli | 5.280 |
| Bewaarkool | 8.540* |
| Gemiddelde | 5.850 |
| Bloembollen | |
| Tulpen | 16.300 |
| Hyacinten | 26.400 |
| Gemiddelde | 21.350 |

*cijfers uit 2005, 2007 niet bekend.

De totale schade in de Noord-Schermer is dan als volgt:

$$0.0916 * 2.070.783 = 189.684$$

$$0.2452 * 1.687.291 = 413.724$$

$$\text{Totaal} = 603.408 \text{ euro}$$

De totale schade in de Zuid-Schermer is 100% van de opbrengst. De schade heeft dus een waarde van $394.992 + 426.360 = 821.352$ euro

Ook voor de veeteelt zal er schade optreden. In de Noord-Schermer zal deze schade meevallen, doordat vee een chlorideconcentratie van 400 mg/l goed aankan. Het chloridegehalte van de Zuid-Schermer zal echter wel problematisch worden. Van vee zijn geen schadefuncties bekend, dus de precieze opbrengstderiving is moeilijk te bepalen.

5.5.3 Alternatieven

Als er niet wordt doorgespoeld wordt het oppervlakte water veelal te zout om gebruiken voor beregening. Als boeren dan toch willen beregenen, zullen er alternatieven vormen van wateraanvoer moeten komen. Hieronder worden enkele behandeld. In het rapport "Inventarisatie maatregelen omtrent interne verzilting" (Acacia Water, 2009) zijn nog veel meer maatregelen beschreven.

Winning en zuivering grondwater

Bij dit alternatief wordt brak grondwater opgepompt, en vervolgens ontzilt en gezuiverd. Een voorbeeld van een installatie die daarvoor gebruikt kan worden is de Memstill installatie, die ontwikkeld is door TNO. Volgens TNO is de Memstill techniek bij "grootschalige toepassingen een stuk goedkoper dan bestaande technieken als bijvoorbeeld omgekeerde osmose, omdat het gebruik maakt van restwarmte." (TNO, 2010) Omdat deze techniek op dit moment de goedkoopste lijkt te zijn, zal deze aangehouden worden om de kosten van zuivering en ontzilting van (grond)water te bepalen.

TNO heeft de kosten van het ontziltingsproces van Memstill vergeleken met gangbare technieken. Bij een grootschalige productie zijn de kosten van het Memstill proces tussen de €0,30 en €1,40 per m³ geproduceerd schoon water. Bij technieken als omgekeerde osmose liggen de kosten hoger, tussen de €0,50 en €1,80 per m³. (TNO, 2005). Voor de berekening van de totale kosten zal een gemiddelde prijs van €0,85 per m³.

In de glastuinbouw wordt ontzilting toegepast, maar in andere sectoren van de landbouw nog niet. De reden hiervoor is dat ontzilten van grondwater relatief duur is waardoor het op dit moment alleen voor kapitaalintensieve teelten rendabel is. In de Schermer zijn geen grootschalige kapitaal intensieve teelten en is het een te dure oplossing is voor dit gebied.

Boeren staan hier ook niet zo positief tegenover. Zij vinden dit over het algemeen een veel te dure oplossing. Waarbij de kosten niet opwegen tegen de baten. Pas als de methode goedkoper wordt zou dit een mogelijkheid kunnen zijn. Een eventuele andere mogelijkheid is het gebruik van dit alternatief op grotere schaal (met meerdere bedrijven). Als de kosten dan laag genoeg worden, zou het dan eventueel mogelijk kunnen zijn.

Opvang regenwater

Bij deze maatregel wordt in water in nattere periodes opgevangen, zodat het in de drogere periodes te gebruiken is. De neerslag wordt opgevangen door het creëren of vergroten van het areaal oppervlaktewater, waarin een variabel peil kan worden gehandhaafd. Het gaat dan dus om het opofferen van ruimte voor de watervoorziening. (Acacia Water, 2009).

In een studie van van Bakel et al (2009) is een kostprijs berekend voor zo'n zoetwateropslag. In deze kostprijs zijn verschillende kosten meegenomen. Ten eerste het productieverlies, dat wordt veroorzaakt door het verlies aan grond. Ten tweede de rente en afschrijving van de aanlegkosten en jaarlijks onderhoud. Ten derde de gebruikskosten, welke gevormd worden door de kosten van de beregening. Uiteindelijk komt hier een kostprijs van €0,85 per m³ (van Bakel et al, 2009).

In praktijk staan boeren hier verschillend tegenover. Een deel van de boeren vind opvang bovengronds geen optie door het verlies aan grond. Zij zouden dan liever een optie zien met ondergrondse opslag door middel van het injecteren van zoet water (zoals al gedaan wordt bij de kassenteelt). Andere boeren kijken positiever aan tegen zo'n alternatief. Dit zal dan moeten gaan in de vorm van een opslagtank in combinatie met efficiënter gebruik van water, door middel van bijvoorbeeld druppelirrigatie.

Aanvoer drinkwaterbedrijf

Bij de aanvoer van het drinkwaterbedrijf betaalt de boer een prijs per afgenomen waterhoeveelheid aan het drinkwaterbedrijf. Dit brengt kosten met zich mee voor de boeren. Het drinkwaterbedrijf in Noord-Holland, voor de Schermer is PWN. PWN heeft speciale tarieven voor zakelijke klanten, deze staan beschreven in Tabel 5.15.

Tabel 5.15. Waterverbruik tarieven 2010 (excl. 6% btw) PWN

| Waterverbruik m ³ | Tarieven 2010 |
|------------------------------|---------------|
| 0-5000 m ³ | € 1,22 |
| 5001-25.000 m ³ | € 1,15 |
| >25.000 m ³ | € 1,05 |

Naast de kosten die betaald moeten worden per m³ water, zijn er ook kosten voor een drinkwaterinstallatie. Er zullen bijvoorbeeld leidingen gelegd moeten worden om een grote hoeveelheid drinkwater te kunnen leveren. Een voorbeeld van het gebruik van drinkwater door de landbouw vindt plaats in Zeeland en Zeeuws-Vlaanderen. Drinkwaterbedrijf Evides legt vanuit de Biesbosch een leiding van 17 kilometer aan om de industrie en de landbouw te kunnen voorzien van water. De investering hiervoor is ongeveer 17 miljoen (Evides, 2009). Dit is een grootschalig project, maar ook op kleinere schaal zal de investering voor drinkwatergebruik in de landbouw hoog zijn. Voor de berekening zullen de waterverbruikkosten gebruikt worden. In de Schermer wordt meer dan 25.000 m³ water gebruikt. Een kostprijs van €1,05 zal dus gebruikt worden voor de berekening van de totale kosten.

Boeren staan over het algemeen negatief tegenover deze vorm van wateraanvoer. Dit alternatief is veel te duur, in vergelijking met de opbrengsten. Eventueel voor korte periodes tijdens schaarste zou dit een tijdelijke oplossing zijn, maar als uit wordt gegaan naar de totale waterverbruik wordt dit alternatief veel te duur. Om dit alternatief wel rendabel te kunnen maken, zou er bijvoorbeeld water met een lagere kwaliteit (een B-kwaliteit), met een goedkoper tarief een optie kunnen zijn.

5.6 Kosten-Baten analyse

Hieronder volgt de kosten-baten analyse. Er is onderscheid gemaakt tussen de verschillende delen van de Schermer. De cijfers zijn berekend op basis van de kosten beschreven in de voorgaande hoofdstukken. Het blijkt dat een scenario met een doorspoelhoeveelheid van 50% de goedkoopste situatie zou zijn.

| | Noord-Schermer | | Zuid-Schermer | |
|---|----------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Kosten | Baten | Kosten | Baten |
| Huidige situatie | | | | |
| Uitlaat | 59.295,52 | | 47.847,36 | |
| Voorkomen schade | | 603.408,00 | | 821.352,00 |
| Totaal | | 544.112,48 | | 773.504,64 |
| 50% doorspoelhoeveelheid | | | | |
| Uitlaat | 29.647,76 | | 23.923,68 | |
| Voorkomen schade | | 603.408,00 | | 821.352,00 |
| Totaal | | 573.760,24 | | 797.428,32 |
| 0% doorspoelhoeveelheid, zonder adaptatie | | | | |
| Schade | 603.408,00 | | 821.352,00 | |
| Verminderde uitlaat | | 59.295,52 | | 47.847,36 |
| Totaal | | 544.112,48 | | 773.504,64 |
| 0% doorspoelhoeveelheid, met zuivering grondwater | | | | |
| Totale kosten alternatief per jaar (waterverbruik per jaar x €0,85) | 300.101,58* | | 146.934,67 | |
| Voorkomen schade | | 603.408,00 | | 821.352,00 |
| Verminderde uitlaat | | 59.295,52 | | 47.847,36 |
| Totaal | | 362.601,94 | | 722.264,69 |
| 0% doorspoelhoeveelheid, met opvang regenwater | | | | |
| Totale kosten alternatief per jaar (waterverbruik per jaar x €0,85) | 300.101,58 | | 146.934,67 | |
| Voorkomen schade | | 603.408,00 | | 821.352,00 |
| Verminderde uitlaat | | 59.295,52 | | 47.847,36 |
| Totaal | | 362.601,94 | | 722.264,69 |
| 0% doorspoelhoeveelheid, met gebruik drinkwater | | | | |
| Totale kosten alternatief per jaar (waterverbruik per jaar x €1,05) | 370.713,71 | | 181.507,54 | |
| Voorkomen schade | | 603.408,00 | | 821.352,00 |
| Verminderde uitlaat | | 59.295,52 | | 47.847,36 |
| Totaal | | 291.989,81 | | 687.691,82 |

* voorbeeld berekening Schermer-Noord: $(198,52 \times 365) + (1427,66 \times 112) + (2.155,41 \times 56) = 353.060,68 \text{ m}^3/\text{jaar} \rightarrow 353.060,68 \times 0,85 = 300.101,58 \text{ euro}$

Een aantal opmerkingen die gemaakt moeten worden bij de kosten-baten analyse:

- Eventuele kosten voor inlaat van water zijn niet meegenomen, omdat waarde van water moeilijk te bepalen is.
- Bij de categorie 'vermindering uitlaat' bij 0% doorpoelen is er vanuit gegaan dat de kosten voor de uitlaat totaal komen te vervallen. In praktijk is dit echter niet zo, omdat er ook verdamping en neerslag is. Er zal dus altijd in- en uitgelaten worden, door de natuurlijke aanvullingen en verliezen. Deze zijn in dit onderzoek niet meegenomen, waardoor verminderde uitlaat dus op nul genomen is.

- Bij de kosten m.b.t. de schades zijn alleen de schades van gewassen meegenomen. Al eerder bleek dat schadefuncties van vee niet bekend zijn. Eventuele schadekosten aan vee, wat ook zorgt voor opbrengstderving, zijn niet meegenomen.
- De schadekosten zijn bepaald aan de hand van de gewasopbrengsten uit 2007. Om het actueler te maken zouden cijfers uit 2009 gebruikt moeten worden. Deze waren echter (nog) niet bekend.
- Verder zijn voor de berekening van de schadekosten de gemiddelde opbrengsten genomen voor klassen, dus niet per gewastypen. Om een nauwkeuriger beeld te krijgen van de schades, zouden de schades per gewastypen bepaald moeten worden.

5.7 Slotopmerkingen

Binnen deze studie zijn nog een aantal punten dat ter discussie gesteld moeten worden.

Ten eerste de kosten van de inlaat. De prijs van de inlaat is zeer moeilijk te bepalen. Er wordt water ingelaten, en niemand betaalt er een prijs voor. Echter, als er een tekort zou optreden kan aan het water een waarde worden toegekend. Zo gaat bij een tekort de verdringingsreeks van het HHNK in werking. Dit betekent dat hoe lager een post op deze lijst staat, hoe minder water deze post krijgt. Dit leidt onvermijdelijk tot opbrengstvermindering en daarmee schade. Je zou dan dus kunnen zeggen dat de waarde van het inlaatwater op dat moment gelijk staat aan opbrengstvermindering.

Ten tweede de verschuiving van kosten bij een situatie met alternatieven vormen van wateraanvoer. In een situatie waarin doorgespoeld word, zijn de kosten voor het leveren van water (in- en uitlaat) voor het waterschap. Zij spoelen de polder door, en zorgen zo voor oppervlaktewater van voldoende kwaliteit. Indien er geen water beschikbaar is moet de agrariër over gaan naar een alternatieve vorm van waterlevering (zelfvoorzienend worden). De installatie- en gebruikerskosten van alternatieve vormen van wateraanvoer zijn dan voor rekening van de agrariër. Zo'n situatie levert dus baten op voor het waterschap, maar worden de kosten voor de agrariër hoger.

Al laatste speelt de verdeling van het landgebruik een zeer grote rol bij de bepaling van de maximale waterkwaliteit. Zoals is gebleken zijn er grote verschillen in chloridegehalten tussen Noord- en Zuid-Schermer. Dit leidt ertoe dat zowel in de Noord-Schermer, als in de Zuid-Schermer een deel van de gewassen een beperking van de doorspoelhoeveelheid wellicht tot schade zal leiden. Door landgebruik te herlokalisieren kunnen de percentages gewasschade verlaagd worden. Zo zouden bijvoorbeeld laagtolerante gewassen als aardappelen meer in de Noord-Schermer moeten worden verbouwd, in plaats van in de Zuid-Schermer. Op deze manier wordt de totale tolerantie van de Zuid-Schermer hoger. Een herverdeling van gewassen zou dus kunnen leiden tot een nog efficiëntere situatie. Echter, in praktijk zijn veranderingen in landgebruik zeer moeilijk te sturen en zal kan dit tot veel weerstand leiden.

5.8 Conclusies

Een situatie met een vermindering van doorspoelhoeveelheid levert een efficiëntere situatie op. Er wordt een hoger percentage van het doorgespoelde water gebruikt, terwijl de kwaliteit niet onder een bepaalde grens komt. Bij een situatie met een wijziging van doorspoelhoeveelheid komt het chloridegehalte van het oppervlaktewater wel dichterbij de grenswaarde, dan bij volledige doorspoeling. Sommige gewassen zullen dan meer risico lopen op schade (zoals de bollenteelt). Er zal bij de doorspoeling dus rekening gehouden moeten worden met een goede verdeling van het water in tijd en ruimte. Alleen dan zal de schade zo klein mogelijk uitvallen.

Een reductie van de doorspoelhoeveelheid naar 50% zal ook in een droog jaar als 2003 niet tot schade leiden in de landbouw.

Uit de kosten-baten analyse blijkt dat de winst met name wordt gemaakt door de reductie in energieverbruik van het gemaal, er hoeft minder uitgemalen te worden. Dit resulteert in 25.000 tot 30.000 euro lagere energiekosten.

In deze studie is uitgegaan dat de kosten van inlaatwater nihil zijn. Echter, als er een tekort zou optreden kan aan het water een waarde worden toegekend. Zo gaat bij een tekort de verdringingsreeks van het HHNK in werking. Dit betekent dat hoe lager een post op deze lijst staat, hoe minder water deze post krijgt. Dit leidt onvermijdelijk tot opbrengstvermindering en daarmee schade. Je zou dan dus kunnen zeggen dat de waarde van het inlaatwater op dat moment gelijk staat aan opbrengstvermindering.

6 REFERENTIES

Acacia Water, STOWA & Leven met Water (2009). Inventarisatie maatregelen omtrent interne verzilting, Definitief rapport.

Acacia Water, STOWA & Leven met Water. (2009). Brochure leven met zout water overzicht huidige kennis omtrent interne verzilting.

Acacia Water (2011). Freshwater intrusion processes, A unique hydrological situation in the Wieringermeer polder. Stagerapport Tijmen Buis, Wageningen Universiteit.

Alterra, Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN5), database grondgebruik.

Animal Science Group (ASG) (1998). Duurzaam watergebruik, Praktijkonderzoek Rundvee, Schapen en Paarden (PR).

Bakker, H. de en Locher, W.P. (1987). Bodemkunde van Nederland, voorpublicatie van deel 2, bodemgeografie, Stichting voor Bodemkartering, Ministerie voor Landbouw en Visserij, Den Bosch

Beekman, H.E. (1991). Ion chromatography of fresh- and seawater intrusion, multicomponent dispersive and diffusive transport in groundwater. PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam. 198 pag.

Beekman, H.E. en Appelo, C.A.J. (1989). De zoetwaterbel van Hoorn in een hydrochemisch perspectief. Intern rapport, Vrije Universiteit. 50 pag.

Boerderij.nl (2010), Grondprijzen Waterland & Droogmakerijen april 2010, geraadpleegd op 17 juni 2010. Via: <kadaster.boerderij.nl>

Buis, T. (2011). Freshwater intrusion processes. A unique hydrological situation in the Wieringermeer polder. Afstudeerscriptie WUR voor Acacia Water.

CBS. Landbouw; gewassen, dieren, grondgebruik, naar gemeente. Geraadpleegd op 8 juni 2010 via:

<[http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=71416ned&D1=0-1,5-6,8,11,17-20,24,27-30,37,40,44-45,52-54,56,60,65&D2=556&D3=0,\(I-2\)-I&VW=T](http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=71416ned&D1=0-1,5-6,8,11,17-20,24,27-30,37,40,44-45,52-54,56,60,65&D2=556&D3=0,(I-2)-I&VW=T)>

CBS. Landbouwtelling; gemeente 1980-2000. Geraadpleegd op 8 juni 2010 via:

<<http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=7316slb&D1=0,738-754,939,971,1009,1013,1020,1023,1038&D2=810&D3=0,10,15,19&VW=T>>

Deltares, Royal Haskoning en Acacia Water (2008). Beschrijving aangepast grondwatermodel Groot-Mijdrecht, achtergrondrapport van de verkenning water Groot-Mijdrecht Noord.

De Vries, H., Vrijhof, B. (1958). De landbouwwaterhuishouding in de provincie Noord-Holland. De waterhuishouding van de landbouwgronden. De verzilting van open wateren. Comm. Onderz. Landbouwwaterhuish. Ned – TNO. Rapport nr. 8.

De Vries, J.J. (1981). Fresh and salt groundwater in the Dutch coastal area in relation to geomorphological evolution, Geologie en Mijnbouw 60, 363-368.

De Vries, J.J. (1996) Prediction in hydrogeology: two case histories. Geol Rundsch (1997) 86: 354-371.

Dijkstra, J. en Volker, A. (1957). Rapporten en mededelingen betreffende de Zuiderzeewerken, No. 6. Geo-electrisch bodemonderzoek in het IJsselmeer – bepaling van het zoutgehalte van het diepe grondwater. Dienst de Zuiderzeewerken.

Engelen, G.B. (1981). An analysis of regional hydrological systems from early Pleistocene to Recent in the Western part of the Netherlands as a basis for geological calculations. St.P.A.V.Gez. Techn.: Mod.Rekenmeth.'81-'82, Delft.

Evides (2009). Uitbreiding Biesbosch-systeem richting Zeeland een feit. Geraadpleegd op 17 juni 2010 via <<http://www.evides.nl/nl/Industrial/news/Pages/UitbreidingBiesboschsysteemrichtingZeelandeenfeit1.aspx>>

Gezondheidsdienst voor dieren (GD), Achtergrondinformatie onderzoek veedrinkwater, geraadpleegd op 8 juni 2010 via <http://gddeventer.com/templates/dispatcher.asp?opage_id=25251333&location=10709026562271558,211100&page_id=25222685>

Gezondheidsdienst voor dieren (GD), Het beste water voor uw paard, geraadpleegd op 8 juni 2010 via <http://www.gddeventer.com/nl/25222685-%5BLink_page%5D.html?opage_id=5208907&location=-1083501812489521,1212674>

Gieske, J.M.J. (1991). De oorsprong van het brakke grondwater in het IJsselmeergebied: diffusie, dispersie, of dichtheidsstroming; H2O 24(7): 189-193.

Griffioen, J. de Louw, P.G.B. , Boogaard, H.L., Hendriks, R.F.A. (2002). De achtergrondbelasting van het oppervlaktewatersysteem met N, P en Cl, en enkele ecohydrologische parameters in West –Nederland. NITG-TNO en Alterra. Prj.nr 005.50358.

Hallewas, D.P. (1984). The interaction between man and his physical environment in the county of Holland between circa 1000 and 1300 AD: a dynamic relationship. Geologie en Mijnbouw 3, p 299-307.

HHNK (2009). Waterbeheersplan 2010-2015; van veilige dijken tot schoon water.

ICW (1982). Kwantiteit en kwaliteit van grond- en oppervlaktewater in Noord-Holland benoorden het IJ, werkgroep Noord-Holland van het ICW. Wageningen, 185 pag.

Jorgensen (1989). Using Geophysical Logs to Estimate Porosity, Water Resistivity, and Intrinsic Permeability, USGS Water Supply Paper 2321.

Kooi, H. and Groen, J. (2000). Groundwater resources in coastal areas: past and ongoing natural processes. In: Evaluation and Protection of Groundwater Resources. Proceedings of a IAH conference in Wageningen, September 2000, Delft, TNO-NITG, pp. 45-57.

Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A. , Jacobs, C.M.J., (2008) SWAP version 3.2. Theory description and user manual, Wageningen, Alterra, Alterra-report 1649, 262 pag.

Krul, W.F.J.M. & Kuffeler, V.J.P. de Blocq van, 1936. Geo-hydrologische gesteldheid van de Wieringermeer. Dienst der Zuiderzeewerken & Rijksbureau voor drinkwatervoorziening. Rapporten en mededeelingen betreffende de Zuiderzeewerken no. 5, Rijksuitgave dienst van de Nederlandsche Staatscourant.

Mazure, J.P., 1936. Geo-hydrologische gesteldheid van de Wieringermeer. *Algemene landsdrukkerij* - 's-Gravenhage, pp.67-131.

Kwadijk, J., Vuren, S. van, Verhoeven, G., Oude Essink, G., Snepvangers, J., Calle, E. (2007). Gevolgen van grote zeespiegelstijging op de Nederlandse zoetwaterhuishouding. Verwachting, schattingen en berekeningen voor het MNP-project "Nederland later".

LEI Wageningen UR en CBS (2009). Land- en tuinbouwcijfers 2009. Hoofdstuk 13 (omrekenings)normen.

Lenntech BV (2009). Water Consumptie per dag, geraadpleegd op 10 juni 2010 via <<http://www.lenntech.nl/water-consumptie.htm>>

LTO Schapenhouderij, december 2004, Hygiënecode schapenhouderij, LTO-Noord pagina 43

Lenderink, G. (2006). KNMI'06 scenarios: interpolation to monthly changes. Notitie KNMI.

Martinez Beltran, J. (1978). Drainage and reclamation of salt affected soils. Bardenas Area, Spain. ILRI publication 24.

Meinardi, C.R. (1974). The origin of brackish groundwater in the lower parts of the Netherlands; R.I.D.-mededelingen 74-6: 16p.

Mulder, E.F.J. de (1979). Samenstelling en verbreiding Holocene afdekkpakket in Noord-Holland (ten noorden van het Noordzeekanaal). Rapport Rijks Geologische Dienst nr. 5302.

Mulder, F.J., Geluk, M.C., Ritsema, I., Westerhoff, W.E., Wong, T.E. (2003). De ondergrond van Nederland. Geologie van Nederland, deel7. NITG-TNO. 379 p.

Nelen en Schuurmans (2007). *Onderzoek watertekort HHNK*.

Oosterwijk, J. (2009). Waterbalansstudie Schermer, Afstudeerscriptie WUR voor Acacia Water.

Oude Essink, G. (2002). Modellering van dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming in het kustgebied. TNO-NITG Informatie.

Paulissen M.P.C.P. & Schouwenberg E.P.A.G. (2007). Leven met Zout Water Deelrapport: Zouttolerantie van zoetwaterafhankelijke natuurdoeltypen; Verkenning en kennislacunes. Rapport van Alterra.

PIRSA (Primary industries and resources, Government of South Australia). (November, 2008). Livestock water supplies. Via <http://www.pir.sa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0008/37763/Livestock_Water_Supplies.pdf>

Plantenziektenkundige dienst, ministerie LNV (2005), Beregeningsverboden.

Geraadpleegd op 23 juni 2010 via:

<http://www.minInv.nl/portal/page?_pageid=142,2268026&_dad=portal&_schema=PORTAL&p_document_id=1949489&p_node_id=5244412&p_mode=>>

Pons, L.J. en Wiggers, A.J., (1959). De Holocene wordingsgeschiedenis van Noord-Holland en het Zuiderzeegebied. Deel I en II. Tijdschrift Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, 76 (pp. 104-152), 77 (pp. 3-57).

Pomper, A.B. (1983). Observations on the hydrochemical groundwater situation of the western Netherlands, *Geologie en Mijnbouw* 62, 585-592.

Post, V.E.A. (2008). Relatie geleidbaarheid met chloride en alkaliniteit. Nog niet gepubliceerd.

Post, V.E.A. (2004). Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene. PhD thesis, Vrije Universiteit.

PWN, (2010). Tarieven drinkwater 2010. Geraadpleegd op 23 juni 2010 via:
<<https://www.pwn.nl/PuurWaterZakelijk/DirectRegelen/Pages/Tarieven%20drinkwater%202007.aspx>>

Royal Haskoning (2010). Oppervlaktewatermodellering Polder de Schermer en Wieringermeerpolder. Rapportnummer 9V0977 R0001.

Roest, C.W.J. van Bakel, P.J.T. Smit, (2003) A.A.M.F.R. Actualisering van de zouttolerantie van land- en tuinbouwgewassen ten behoeve van de berekening van de zoutschade in Nederland met het RIZA-instrumentarium. Rapport van Alterra.

Stuyfzand, P.J. (1987). A very accurate calculation method of the electrical conductivity of water: version 2. Kiwa report SWE 87.006, 32p.

Stuyfzand, P.J. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands; Faculty of Earth Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam: 366 p.

Van Bakel, P.J.T. Poelman, A. Kielen, N. & Hoogewoud, J. (2009). "Waterreservoirs op bedrijfsniveau alternatief voor zoetwatervoorziening landbouw?". *H₂O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*. 42(18), 43-46.

Van Beers, W.F.J. (1979). The auger hole method. A field measurement of the hydraulic conductivity of soil below the water table. ILRI publication 5th edition, Wageningen. 23p.

van Dam, A.M. Clevering, O.A. Voogt, W. Aendekerk, Th.G.L. & van der Maas, M.P. (2007). *Leven met Zout Water, Deelrapport: Zouttolerantie van landbouwgewassen*.

Van der Molen, W.H. (1989). Het zoute grondwater in West-Nederland: een gevolg van dichtheidsstromingen? *H₂O* 22(11): 330-346.

Van Immerzeel, C.H., Vegter, U., Schot, P.P. (1996). Toepassing van een neerslaglenzenmodel bij hydro-ecologische herstelprojecten (Application of a rain water lens model to hydro-ecological restoration projects). *H₂O* 26 (10), 293-296.

Van Staveren G, Velstra J. (2011). Klimaatverandering, toenemende verzilting en landbouw in Noord-Nederland. *Acacia Water report nr. 333*.

Velstra, J, van Diepen, R., Hoogmoed, M., Groen, J., Groen, M. (2008) Grondwateronderzoek Verkenning Water Groot Mijdrecht Noord tweede fase: Aanvullend veldonderzoek Groot Mijdrecht Noord. *Acacia Water*. Nr. 282.

Velstra, J., Hoogmoed, M., Groen, J. (2009). Inventarisatie maatregelen omtrent interne verzilting. Acacia Water. Nr. 203.

Velstra, J. Groen, J. en Boomgaard, M. (2010). Mogelijkheden voor beperking van inlaatwater in polders. H2O jrg 43, nr 17.

Versluys, J. (1931). Subterranean water conditions in the coastal regions of the Netherlands; Economic geology 26: 65-95.

Volker A (1961) Source of brackish groundwater in the Pleistocene formations beneath the Dutch polderland. Econ Geol 56 : 1045-1057

Volker, A. (1962). Geo-electrisch onderzoek, Noord-Holland. Rijkswaterstaat – Dienst voor de waterhuishouding. Tekstdocument met 7 bijlagen.

Westerhoff, W.E., de Mulder, E.F.J., de Gans, W. (1987). Toelichtingen bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000, Blad Alkmaar West (19W) en Bland Alkmaar Oost (19O). Rijksgeologische dienst, Haarlem.

Willemsen, A. (1981). Zoet en zout grondwater onder Noord-Holland en het IJsselmeergebied. Intern VU rapport.

Wirdum, G. van. (2004). Investigation into the direction and magnitude of water flow through peat at Thorne Moors, UK. TNO rapport.

Witt, H. (1980). Werkgroep Noord-Holland X. Het chloridegehalte van het grondwater in Noord-Holland benoorden het IJ en het Noordzeekanaal. Nota ICW 1173. 12p.

Witt, H. en Wit, K.E. (1982). Het verziltingsproces in de ondergrond van Noord-Holland. Nota ICW 1323.

ten Voorde, M. (2004). Watertekort in het Hollands Noorderkwartier 'Het bepalen van de kwantitatieve bijdrage van oplossingen voor het watertekort en een uitwerking van het watertekort in de Schermer-Noord.' Universiteit Twente. Hoofdstuk 3.2

TNO, Duurzaam drinkwater met Memstill®. Geraadpleegd op 15 juni 2010 via:
<http://www.tno.nl/content.cfm?context=markten&content=case&laag1=186&item_id=992>

TNO-NITG (2002). De achtergrondbelasting van het oppervlaktewatersysteem met N, P en Cl, en enkele ecohydrologische parameters in West –Nederland. NITG 02-166-A.

Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. J. Geophys. Res. 68, 4795–4812.

Bijlagen