

KWR 2024.061 | Augustus 2024

Wolphaartswater: zoet water uit een zoute ondergrond

**Mogelijkheden voor ondergrondse
waterberging op Wolphaartsdijk**

Colofon

Wolphaartswater: zoet water uit een zoute ondergrond

KWR 2024.061 | Augustus 2024

Opdrachtnummer

403857

Projectmanager

ir. H.J.M. (Eric) Broers

Opdrachtgever

Provincie Zeeland

Auteur(s)

L.P. (Lennart) Brokx MSc., dr. G. (Gilian) Schout

Kwaliteitsborger(s)

dr. N. (Niels) Hartog

Verzonden naar

Dit rapport is openbaar

Keywords

Ondergrondse waterberging,
OWB, ASR, Waterbeschikbaarheid

Jaar van publicatie
2024

Meer informatie
Dr. Gilian Schout
T +31 6 54293662
E gilian.schout@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR

Augustus 2024 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

Aanleiding en onderzoeksopzet

In de polders van het voormalig eiland Wolphaartsdijk is op dit moment geen enkele vorm van zoetwatervoorziening, waardoor de agrarische sector gevoelig is voor droogteschade. Ondergrondse waterberging (OWB) biedt potentieel een mogelijkheid om hier verandering in aan te brengen door de 's winters vallende neerslag, dat in de huidige situatie via stuwen uit het gebied afstroomt, ondergronds op te slaan en vervolgens terug te winnen in periodes van droogte. Het grondwater in het gebied is echter zeer zout en de omstandigheden voor ondergrondse waterberging (OWB) zijn daardoor zeer uitdagend.

Het onderzoek bestond uit drie fasen: een verkennende bureaustudie, een veldwerkcampagne en vervolgens het nadere haalbaarheidsonderzoek op basis van de resultaten van de veldwerkcampagne en data uit externe bronnen. Het veldwerk bestond hoofdzakelijk uit (1) boringen en sonderingen om de lokale bodemopbouw en geohydrologie in detail te karakteriseren en (2) bemonstering van oppervlakte-, drain- en grondwater om de chemische samenstelling hiervan te bepalen.

Bodemopbouw en geohydrologie

De resultaten van het veldwerk tonen aan dat de watervoerende zandlaag direct onder de holocene deklaag voldoende dik en doorlatend is om water te kunnen infiltreren met redelijke infiltratiedebieten per put, waardoor de voor infiltratie benodigde hoeveelheid grondwaterputten relatief beperkt kan blijven. De aanwezigheid van (storende) kleilagen binnen deze watervoerende laag varieert echter sterk zonder een duidelijk ruimtelijk patroon. Dit kan zowel een sterke invloed hebben op de infiltratiecapaciteit op een gegeven locatie als op de terugwinefficiëntie van een OWB-systeem.

Waterkwaliteit

Uit het onderzoek is gebleken dat zowel het oppervlakte- als het drainwater bestrijdingsmiddelen bevat die een bepaalde mate van voorzuivering zullen vereisen voor infiltratie. Vanuit operationeel oogpunt bevat daarnaast met name het oppervlaktewater, en in mindere mate ook het drainwater, te hoge concentraties zwevende stof en potentie voor biologische groei, wat tot snelle putverstopping kan leiden. Ook hiervoor zal een flinke voorzuivering nodig zijn. Technisch gezien is de benodigde zuivering goed mogelijk. De mate van voorzuivering zal echter geoptimaliseerd moeten worden, zodat aan de operationele- en vergunningseisen voldaan wordt zonder dat investerings- en operationele kosten te hoog oplopen.

Waterbalans

De jaarlijkse hoeveelheid afstromend zoet water ($EGV < 2 \text{ mS/cm}$) in het winterhalfjaar is gemiddeld veel groter dan de geschatte jaarlijkse watervraag op basis van het huidige landgebruik. Zeker wanneer gestart wordt met een systeem op kleine schaal zal waterbeschikbaarheid dus geen probleem zijn. Uit berekeningen in dit onderzoek blijkt echter dat het niet realistisch is dat 100% van het afstromend water afgevangen en geïnfiltreerd kan worden, tenzij er een zeer hoge infiltratiecapaciteit (veel putten) en een grote bovengrondse buffercapaciteit gerealiseerd wordt. Daarnaast is gebleken dat de hoeveelheid afstromend water van jaar tot jaar sterk varieert, en er dus ook jaren kunnen zijn met een zeer lage waterbeschikbaarheid en een beperkte aanvulling van het systeem. Voor de pilot zal onderzocht moeten worden welk deel van het afstromend daadwerkelijk afgevangen kan worden, hoe dit bij verdere opschaling kan worden geoptimaliseerd en hoe met de verdeling van het water bij schaarste omgegaan kan worden.

Haalbaarheid OWB o.b.v. modelsimulaties

Uit de modelresultaten blijkt dat voldoende hoge terugwinefficiënties niet mogelijk zijn met conventionele grondwaterputten, maar dat de terugwinning sterk kan worden verbeterd door de toepassing van onconventionele putontwerpen: ofwel putten met meerdere boven elkaar geplaatste verticale filters ('Multiple Partially Penetrating Wells', MPPW) of horizontaal geboorde putten ('Horizontal Directionally Drilled Wells', HDDW). De terugwinefficiëntie is sterk afhankelijk van de geohydrologische condities maar zelfs in de meest ongunstige gevallen werden in de simulaties na 5 jaar terugwinefficiënties van zo'n 20 tot 30% bereikt. Gegeven de veel grotere waterbeschikbaarheid dan de watervraag is dit voldoende om via OWB in de watervraag te voorzien. In de meest gunstige gevallen was het berekende opslagrendement zo'n 70-80%. Dit zou betekenen dat een veel kleiner volume geïnfilterd hoeft te worden om in de watervraag te voorzien, waardoor bijvoorbeeld ook minder putten en een kleinere voorzuivering nodig zijn. Dit zou dan ook positief doorwerken op de uiteindelijke algehele financiële haalbaarheid.

Conclusies

Concluderend tonen de resultaten van dit onderzoek aan dat het met OWB technisch gezien mogelijk is om te voorzien in de watervraag van de agrariërs in dit gebied, op schaalgroottes variërend van lokaal tot regionaal. Er zijn echter nog aanzienlijke onzekerheden die uiteindelijk bepalen of de benodigde inspanning en de kosten voor het opslaan en terugwinnen van het water in proportie staan tot de winst in waterbeschikbaarheid en droogtebestendigheid. Geadviseerd wordt daarom om in een volgende fase te starten met een of twee OWB-systemen op kleine/middelgrote schaal, zodat de resterende onzekerheden verder kunnen worden onderzocht en om te bepalen hoe systemen zo efficiënt mogelijk kunnen worden ingericht om uiteindelijk op de volledige schaal van Wolphaartsdijk voldoende waterbeschikbaarheid te realiseren.

Inhoud

Colofon	2
Samenvatting	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Doel en opzet onderzoek	9
1.3 Leeswijzer	9
1.4 Gebiedsschets op hoofdlijnen	10
1.4.1 Oppervlaktewatersysteem	10
1.4.2 Gebiedsgeschiedenis	10
1.4.3 Ondergrond	11
2 Opzet veldwerkcampagne	14
2.1 Boringen en sonderingen	14
2.1.1 Boringen	14
2.1.2 CPT-sonderingen	16
2.1.3 HPT-sonderingen met mini-pompproef	16
2.2 Waterkwaliteit	16
3 Bodemopbouw en geohydrologie	18
3.1 Stratigrafie, lithologie en vergelijking meetmethoden	18
3.2 Invloed ontstaansgeschiedenis van Wolphaartsdijk op geohydrologie op gebiedsschaal	19
3.3 Geohydrologische parametrisering	21
3.4 Grondwaterstroming	24
3.4.1 Horizontaal	24
3.4.2 Verticaal	25
4 Waterkwaliteit	26
4.1 Oppervlaktewater	26
4.1.1 Zoutgehalte	26
4.1.2 Operationele kwaliteit (verstoppingsrisico)	28
4.1.3 Milieuaspecten (vergunbaarheid)	29
4.1.4 Benodigde voorzuivering	30
4.2 Grondwaterkwaliteit	31
4.2.1 Zoutgehalte	31
4.2.2 Chemische samenstelling	32
5 Waterkwantiteit	33
5.1 Waterbalans	33
5.1.1 Neerslag, verdamping en neerslagoverschot	33

5.1.2	Afvoerdebiet	35
5.2	Maximaal infiltratievolume	36
5.2.1	EGV afstromend water bij stuwen	36
5.2.2	Infiltratiedebiet per put	37
5.2.3	Afvangen piekafvoer en benodigde buffercapaciteit	38
5.2.4	Benutting putcapaciteit	40
5.3	Watervraag en beschikbaarheid voor een voorbeeldagrariër	41
6	Grondwatermodellering	43
6.1	Modelopzet	43
6.1.1	Geohydrologie	43
6.1.2	Bedrijfsvoering	44
6.1.3	Discretisatie	45
6.1.4	Randvoorwaarden en startcondities	46
6.2	Modelvarianten	46
6.2.1	Geohydrologie en putontwerp	46
6.2.2	Jaarlijks opslagvolume	48
6.3	Modelresultaten	49
6.3.1	Putontwerp	49
6.3.2	Bruikbare diepte eerste watervoerende pakket	51
6.3.3	Weerstand Oosterhout Klei	52
6.3.4	Opslagvolume	53
6.4	Terugvertaling modelresultaten naar de praktijk	55
6.4.1	Doelmatigheid	55
6.4.2	Onzekerheid over de ondergrondeigenschappen	55
6.4.3	Verschillen tussen de systeemconfiguraties	56
7	Inpassing OWB bij verschillende schaalgroottes	57
7.1	Individueel	58
7.2	Collectief	58
7.3	Regionaal	59
7.4	Doorkijk naar pilotfase	60
7.4.1	Benodigde voorzuivering en vergunningen	60
7.4.2	Putontwerp: verticaal (MPPW) vs. horizontaal (HDDW)	60
7.4.3	Invulling van zoetwaterbehoefte agrariërs	61
7.4.4	Locatiekeuze	61
8	Conclusies	63
	Referentielijst	65
	Bijlage I: Vergelijking stratigrafie REGISII en GeoTOP	68
	Bijlage II: Boorstaten	69

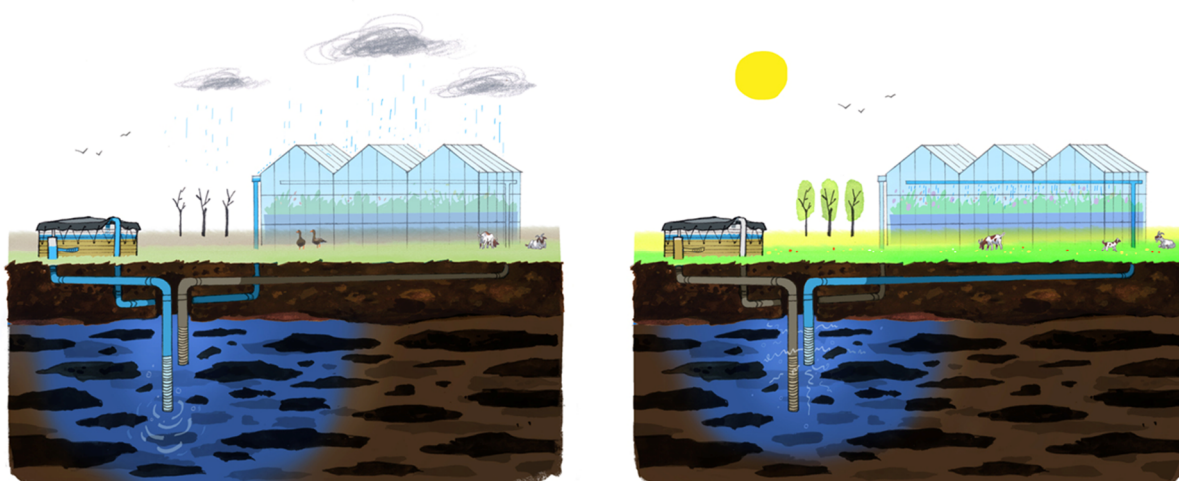
1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In de polders van het voormalige eiland Wolphaartsdijk is op dit moment geen enkele vorm van zoetwatervoorziening, waardoor de agrarische sector gevoelig is voor droogteschade. De oppervlaktewateren zijn er 's zomers, wanneer er watervraag is, te zout voor irrigatie. Het regenwater dat valt in de winter kan door een dik kleipakket aan het maaiveld ook niet in de bodem infiltreren en stroomt daardoor af naar het Veerse Meer en uiteindelijk naar zee. Hierdoor blijft het grondwater beneden de kleilaag brak tot zout en vormt er zich van nature geen zoetwaterbel, zoals bijvoorbeeld op de Zeeuwse kreekruggen wel gebeurt.

Door klimaatverandering is de verwachting dat er steeds langere droge periodes zullen voorkomen in de lente en zomer (KNMI, 2023). De drie opeenvolgende zeer droge zomers van 2018, 2019 en 2020 waren een duidelijk voorbeeld van dit weerbeeld. In Wolphaartsdijk, waar het grondwater en oppervlaktewater in deze periodes geen oplossing bieden, en de landbouw dus volledig afhankelijk is van neerslag, heeft dit als gevolg dat het risico op droogteschade sterk toeneemt en het bedrijven van landbouw wordt bemoeilijkt. Tegelijkertijd worden er 's winters grote hoeveelheden relatief zoet water afgevoerd om de polder droog te houden en het land bewerkbaar.

Vanwege de beschikbaarheid van zoet oppervlakte water in de winter is in opdracht van Provincie Zeeland onderzocht of ondergrondse waterberging (OWB), ook wel ASR ('Aquifer Storage and Recovery') genoemd, voor Wolphaartsdijk kan dienen als duurzame en toekomstbestendige zoetwaterbron voor de landbouw. Met OWB-systemen kan een temporele mismatch in waterbeschikbaarheid overwonnen worden door tijdelijke opslag van overschotten in watervoerende lagen in de ondergrond (Figuur 1-1). Zo kan daarmee winterse neerslag worden bewaard voor gebruik in de zomer en lente. Deze techniek wordt al op grote schaal toegepast in de glastuinbouw in andere delen van Nederland (Zuurbier, 2016), en in mindere mate ook in de drinkwatersector (Zuurbier et al., 2018a) en in stedelijk gebied (Zuurbier & Van Dooren, 2019).

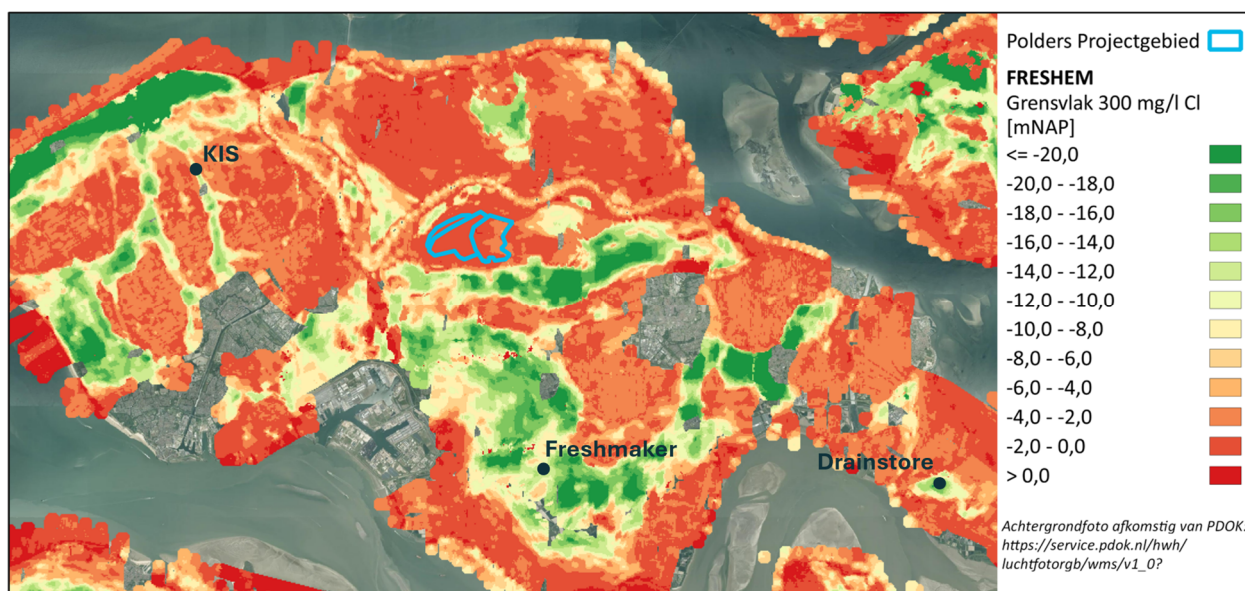


Figuur 1-1. Schematische illustratie van de werking van ondergrondse waterberging in de glastuinbouw. Bron: Zuurbier et al., 2019. Illustratie: Irenegoede.nl.

Het deel van het geïnjecteerde water dat ook weer kan worden teruggewonnen wordt ook wel het terugwinrendement of de terugwinefficiëntie genoemd. Dit opslagrendement is niet 100% doordat het geïnjecteerde water zich aan de randen altijd wat vermengt met het reeds aanwezige grondwater. Het

opslagrendement hangt daarmee ook sterk af van het zoutgehalte van het grondwater, en in grote delen van Zeeland is het grondwater op geringe diepte al zout. Hierdoor kan er maar een zeer beperkte hoeveelheid vermenging veroorloofd worden. Bovendien zal het geïnfiltreerde zoete water gaan opdrijven in het opslagpakker door het dichtheidsverschil met het zoute grondwater, wat OWB in een zoute omgeving nog moeilijker maakt. Hierdoor is de toepassing van OWB in de Provincie Zeeland tot nog toe beperkt tot relatief kleinschalige systemen in de beperkte zoete grondwatervoorkomens die er wel zijn (Oude Essink et al., 2014).

Tot nu toe zijn er twee OWB-systemen speciaal ontwikkeld voor toepassing in de zoetwaterlenzen in de kreekruggen. Deze systemen staan bekend als het 'kreekruginfiltratiesysteem' in Serooskerke (Pauw et al., 2015) en het 'Freshmaker' systeem in Ovezande (Zuurbier et al., 2018b). Dit zijn echter geen conventionele OWB-systemen met verticale infiltratie- en onttrekkingsputten op diepte in het grondwater, maar werken door de groei van de natuurlijke, freatische, zoetwaterlens te stimuleren met peilgestuurde drainage (kreekruginfiltratiesysteem) of door het brakke grondwater onder de zoetwaterlens te onttrekken met een horizontale put en met een bovenliggende horizontale put zoet water te infiltreren (Freshmaker). Het 'Drainstore' systeem in Kruiningen maakt wel gebruik van verticale infiltratie- en onttrekkingsputten op diepte, maar door de voor Zeeuwse begrippen ongebruikelijke situatie van een zoet grondwatervoorkomen onder de Holocene kleilaag zijn de uitgangspunten punten hier aanzienlijk gunstiger dan in Wolphaartsdijk (en op veel andere plekken in Zeeland).



Figuur 1-2. Ligging van het projectgebied (blauwomlijnde polders) getoond over de 'FRESHEM'-kaart met de diepte van de zoet-brak overgang (300 mg/l). Ook de locaties van de benoemde andere projecten in de Provincie Zeeland zijn weergegeven op de kaart (KIS = kreekruginfiltratiesysteem).

Een exacte grens voor het maximale zoutgehalte tot waar OWB toepasbaar is valt niet eenduidig te stellen, omdat dit ook afhangt van andere factoren zoals de doorlatendheid van de watervoerende laag en het opslagvolume. In internationale literatuur zijn bijvoorbeeld grenzen genoemd van ~5.500 mg Cl/l (gelijk aan een TDS van 10.000 mg/l, Brown (2005) en 11.000 mg/l (TDS van 20.000 mg/l, Missimer et al., (2002)) waarboven het opslagrendement dusdanig ver afneemt en OWB niet meer rendabel zou zijn. In de Nederlandse praktijk valt in ieder geval te stellen dat OWB tot nog toe niet is toegepast bij chloride concentraties hoger dan enkele duizenden milligram per liter chloride (Zuurbier et al., 2013).

Ondergrondse waterberging is niet de enige mogelijke techniek voor het afvangen van het 's winters afstromende water; ook bovengrondse opslag in een bassin is een mogelijkheid en wordt door één agrariër in het gebied ook al toegepast. Nadelen van bovengrondse opslag zijn dat: (1) het landgebruik aanzienlijk groter is en er dus een groter landbouwareaal verloren gaat, (2) het opgeslagen water gevoeliger is voor bijvoorbeeld biologische groei en (3) de

aanleg van bovengrondse bassins visueel meer impact heeft in het landschap. Er zijn echter ook voordelen, te weten: (1) er is geen zuivering nodig en (2) er treedt geen vermenging met het zoute grondwater waardoor het opslagrendement nagenoeg 100% kan zijn, en er dus minder water hoeft worden opgeslagen.

1.2 Doel en opzet onderzoek

Doel van dit onderzoek is om de mogelijkheden voor de inzet van OWB te onderzoeken als duurzame zoetwaterbron voor de agrariërs in het projectgebied, ondanks de in termen van zoutgehalte ongunstige uitgangspositie. Daarbij is enerzijds gekeken naar (technische) optimalisaties in het systeemontwerp, zoals de toepassing van meerdere boven elkaar geplaatste verticale filters ('MPPW', zie bijv. Zuurbier et al., 2014), horizontale putten ('HDDW', zie bijv. Zuurbier et al., 2015), en naar de toepassing van grote opslagvolumes. Anderzijds is er aanvankelijk ook gekeken naar de specifieke ondergrondse situatie in het gebied die is ontstaan door de geschiedenis van het landschap.

Concreet zijn de belangrijkste vragen:

- Is de ondergrond in het projectgebied in potentie geschikt voor de opslag van zoet water, ondanks de hoge zoutgehaltes van het grondwater?
- In hoeverre is de waterkwaliteit van zowel bron als ontvangend grondwater geschikt voor toepassing van OWB?
- Hoe kan een OWB-systeem technisch zo slim mogelijk worden ingericht om zo veel mogelijk afstromend zoet water te kunnen infiltreren?
- Hoe kan een OWB-systeem technisch zo slim mogelijk worden ingericht om zo veel mogelijk van het geïnfiltreerde zoete water terug te kunnen winnen met de gewenste kwaliteit?
- Wat zijn de niet-technische randvoorwaarden voor grootschalige OWB op deze locatie?

Het onderzoek dat is uitgevoerd bestond hoofdzakelijk uit drie onderdelen. Allereerst een verkennende bureaustudie op basis van de bestaande gegevens op basis waarvan een eerste inschatting van de haalbaarheid is gemaakt en waarin de belangrijkste ontbrekende gegevens zijn gedefinieerd. Vervolgens is op basis van deze bureaustudie een veldwerkcampagne uitgedacht en uitgevoerd. Het laatste onderdeel was het nadere onderzoek op basis van de resultaten van de veldwerkcampagne. De resultaten van dit laatste onderdeel staan omschreven in dit rapport.

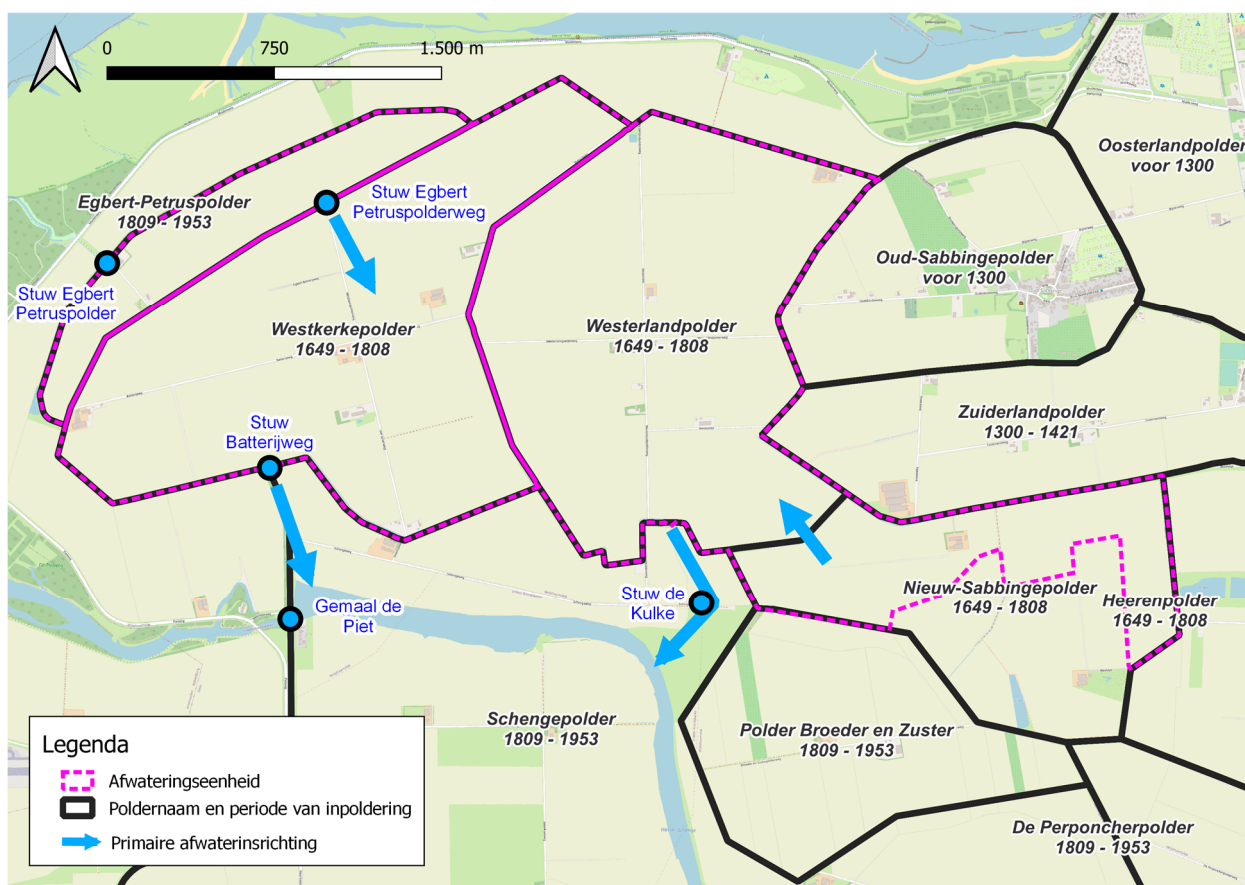
1.3 Leeswijzer

Dit rapport start in Paragraaf 1.4 met een gebiedsschets van het landschap grotendeels op basis van de bureaustudie die is uitgevoerd als eerste stap in het project. In deze gebiedsschets worden de werking van het oppervlaktewatersysteem, de (geografische) ontstaansgeschiedenis en de ondergrondse bodemopbouw omschreven. Hoofdstuk 2 omschrijft de details van de veldwerkcampagne die op basis van deze eerste analyse is uitgevoerd. De daadwerkelijke analyse op basis van de resultaten van zowel de veldwerkcampagne gecombineerd met gegevens uit andere externe bronnen komt aan bod in Hoofdstukken 3, 4 en 5, met achtereenvolgens de analyse van de bodemopbouw en geohydrologie, het oppervlaktewatersysteem en waterbalans, en als laatste de waterkwaliteit. Dit alles komt vervolgens samen in Hoofdstuk 6 waarin verschillende opties voor mogelijke OWB-systemen in het gebied worden doorgerekend met behulp van numerieke modellen. Hoofdstuk 7 is vervolgens een discussie van de haalbaarheid en doelmatigheid van OWB in het gebied, en de belangrijkste aandachtspunten die hierbij komen kijken. Het rapport eindigt met de conclusies in Hoofdstuk 8.

1.4 Gebiedsschets op hoofdlijnen

1.4.1 Oppervlaktewatersysteem

Het onderzoeksgebied bestaat hoofdzakelijk uit 3 polders gelegen ten westen van het dorp Oud Sabbinge: De Westerlandpolder, De Westkerkepolder en de Egbert Petruspolder (Figuur 1-3). Deze polders zijn onderdeel van het grotere afvoergebied de Westerschenge dat via Gemaal de Piet afwatert op het Veerse Meer (Figuur 1-3). De Westerlandpolder vormt samen met een deel van de Nieuw Sabbingepolder een enkel afwateringsgebied van 323 Ha, waarvan water via Stuw De Kulke naar de Westerschenge geleid wordt. Het tweede afwateringsgebied is de Westkerkepolder, die ontsloten wordt via stuw Batterijweg. Het laatste afvoergebied is de Egbert Petruspolder. Onder normale omstandigheden wordt dit gebied afgewaterd via de Westkerkepolder en dus ook via Stuw Batterijweg. Het totale afvoergebied van stuw Batterijweg is daarmee 307 Ha. Onder extreme omstandigheden kan er echter ook via Stuw Egbert Petruspolder direct op het Veerse Meer afgewaterd worden. Deze drie afvoergebieden omvatten in principe het wingebied voor water dat gebruikt zou kunnen worden voor infiltratie. Het totale oppervlak van het gebied is 630 hectare.



Figuur 1-3. Oppervlaktewatersysteem van het studiegebied in Wolphaartsdijk. De verschillende polders zijn zwart omrand, met labels die de naam van de polder en de periode van inpoldering aangeven (bron: cultuurhistorische kaart Zeeland - <https://www.zeeland.nl/loket/kaarten-en-cijfers/kaarten/kaart-cultuurhistorie-zeeland>). De afwateringsgebieden op de westkant van Wolphaartsdijk zijn met roze stippellijnen aangegeven. De blauwe peilen geven de primaire afvoerrichting aan van het oppervlaktewater.

1.4.2 Gebiedsgeschiedenis

Om de huidige (geo)hydrologische situatie goed te kunnen begrijpen is het belangrijk de totstandkoming van het landschap en de ondergrond bij Wolphaartsdijk te doorgronden. Deze is namelijk het gevolg van een dynamisch proces met veel veranderingen in de laatste duizenden en honderden jaren, die hun weerslag hebben op de bodemopbouw en het geohydrologische systeem.

Aan het einde van de laatste ijstijd (ca. 11.700 jaar geleden) was de zeespiegel veel lager dan nu. Zeeland was destijds bedekt met een laag dekzand afkomstig van de Noordzeebodem, die gedurende een groot deel van deze ijstijd een woestijn was (Oude Essink et al., 2009). In de polders ten westen van het dorp Wolphaartsdijk (waar het projectgebied ligt) ligt deze afzetting tegenwoordig op zo'n 15 m onder het maaiveld. Na de ijstijd steeg de zeespiegel en vormden zich na enkele duizenden jaren duinen en strandwallen langs de Noordzeekust, inclusief Zeeland. Zoet water dat door beken en rivieren werd aangevoerd kon zich nu ophopen achter deze duinen en vormde een veenmoeras. In nagenoeg heel Zeeland, met uitzondering van delen van Zeeuws-Vlaanderen, ontstond hierdoor een dik veenpakket aan het maaiveld.

Toen de zeespiegel nog verder steeg doorbrak de zee op meerdere plekken de strandwallen, en vormden zich getijdengeulen door de veenafzettingen heen. Ergens in deze periode raakte het veengebied op de locatie het latere Wolphaartsdijk omsloten met een aantal grotere geulen (voorgangers van de Schengen en de Zuidvliet) en doorsneden door een noord-zuid geul ten westen van het huidige Oud-Sabbinge, waardoor er in het gebied 2 eilanden ontstonden, waarvan het westelijke eiland het huidige projectgebied beslaat. In de geulen werd het veen en een deel van de onderliggende pleistocene zanden weggesleten. Op de eilanden bleven de pleistocene zanden intact.

In de hierop volgende periode slibben de geulen juist weer op: eerst met zand en naarmate ze ondieper werden met klei. Op de schorren vestigden zich weer meer mensen die vervolgens stukken land bedijkten (Het Ontstaan van Zeeland, 2013). De polder Oud Sabbinge, gelegen rond het dorp Oud Sabbinge, is een van de vroegst bedijkte polders van Zeeland (van voor het jaar 1216). De polders ten westen hiervan pas eeuwen later: de Nieuw Sabbingepolder, Westerlandpolder en Westkerkepolder allemaal in de 17^e eeuw, en de Egbert Petruspolder pas in de 19^e eeuw (zie Figuur 1-4). In 1809 kwam Wolphaartsdijk weer aan Zuid Beveland te leggen door de bedijking van Wilhelminapolder, waarna ook de rest van de breedte van de Schenge ten zuiden van Wolphaartsdijk volledig ingepolderd werd. In de jaren 60 van de twintigste eeuw werden als onderdeel van de Deltawerken de Zandkreekdam en de Veerse Gatdam gebouwd, waardoor het Veerse Meer ontstond. Dit vormt nog altijd de noordgrens van het voormalig eiland.



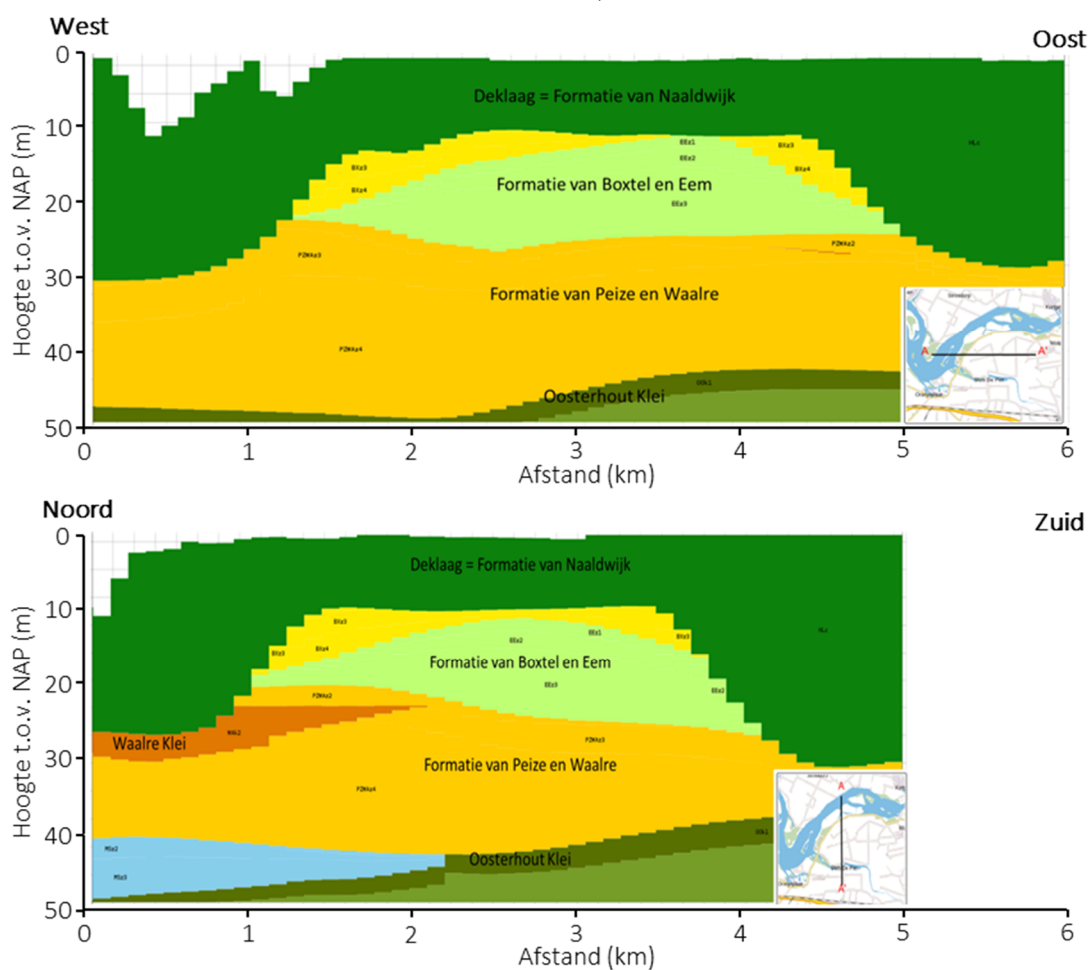
Figuur 1-4. Historische kaarten van Wolphaartsdijk en omgeving. Links: Kaart van Visscher Roman (1650). Rechts: Militaire kaart (1850). In de rechter situatie is Wolphaartsdijk al geen eiland meer, door inpoldering van de Wilhelminapolder. In de linker situatie is te zien dat de Westkerkepolder en de Egbert Petruspolder nog niet bedijkt waren, maar dat zich hier een schor gevormd had.

1.4.3 Ondergrond

Figuur 1-5 geeft een schematische weergave van de lagenopbouw op Wolphaartsdijk, zoals geïnterpreteerd door het ondergrondmodel REGIS II (Vernes & van Doorn, 2005). In deze interpretatie is de oorsprong van het landschap, zoals hiervoor omschreven, duidelijk herkenbaar. Op het voormalige westelijk eiland van rond de eeuwwisseling (zie vorige Paragraaf 1.4.2) is de Holocene deklaag relatief dun en liggen de Pleistocene afzettingen op ca. 10 tot 15 m-mv. Hieromheen zijn de Holocene afzettingen met zo'n 30 m significant dikker, door toedoen van de krekken die dit deel van het voormalige eiland Wolphaartsdijk omringden en doorkruisten. De Pleistocene formaties zijn

daardoor weggespoeld en vervangen door Holocene geulafzettingen, die nu direct bovenop de laat Pliocene tot vroeg Pleistocene Formatie van Peize/Waalre liggen en ze deels omsluiten (Figuur 1-5).

Op basis van het REGIS model behoren de Pleistocene afzettingen achtereenvolgens tot de Formaties van Bortel, Eem, en Peize/Waalre (Figuur 1-5). In de meest recente update GeoTOP model specifiek voor de Provincie Zeeland (TNO, 2023) worden de Formatie van Bortel en Eem voor een groot deel toegeschreven aan de Formatie van Koewacht (zie Bijlage I). Vanuit het perspectief van de haalbaarheid van OWB is echter vooral de doorlatendheid van de verschillende afzettingen belangrijk. Deze doorlatendheid wordt met name bepaald door de lithologie (grondsoort) en de opslaglaag zelf bestaat daardoor ideaal gezien uit een goed doorlatend zand, terwijl met name boven maar liefst ook onder de opslaglaag kleilagen aanwezig zijn zodat het wegrijven van het geïnjecteerde zoete water en het van onder aantrekken van zouter water beperkt wordt.

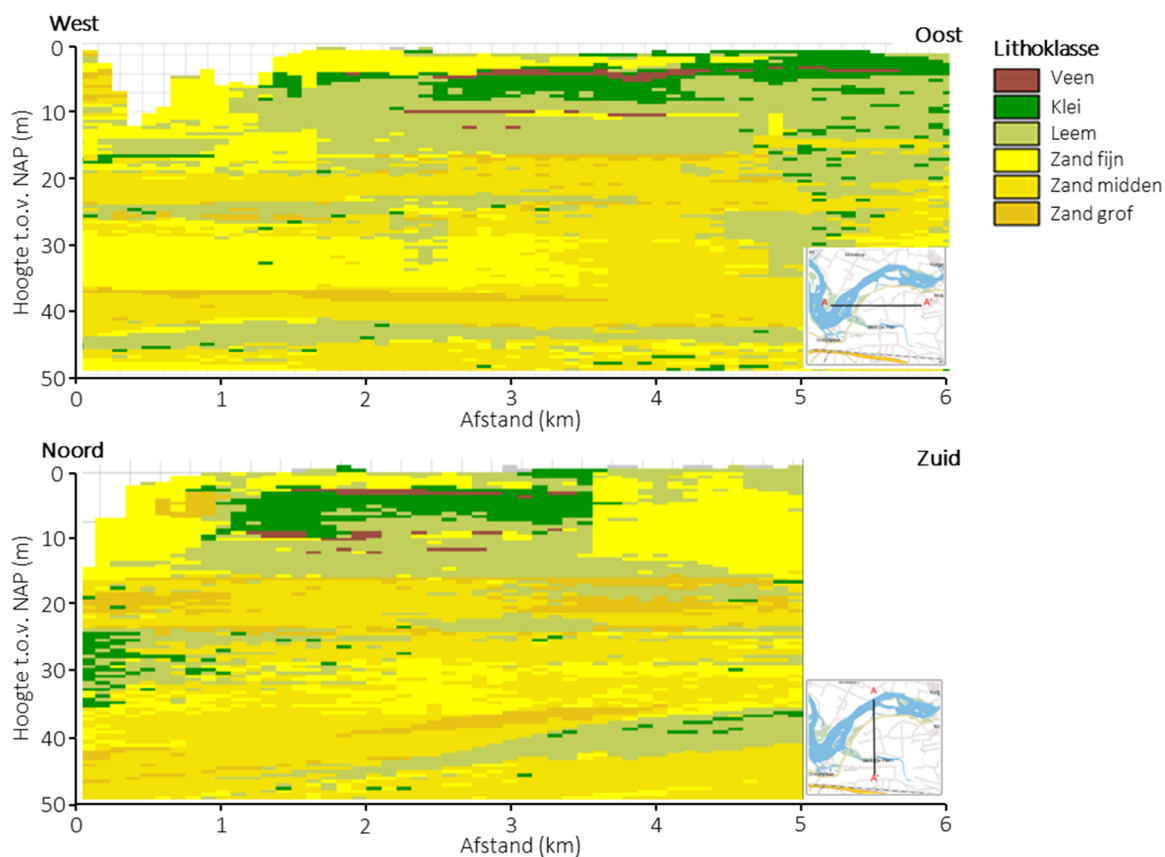


Figuur 1-5. West-oost doorsnede (boven) en noord-zuid doorsnede (beneden) met een schematische weergave van de laagpakketten in de ondergrond van Wolphaartswater afkomstig uit REGIS II (Vernes en van Doorn, 2005).

In Figuur 1-6 is de lithologische bodemopbouw (grondsoort) van het gebied te zien volgens de geüpdatete versie van het GeoTOP model voor dezelfde twee doorsnede als in Figuur 1-5. Hier is te zien dat de potentiële opslaglaag voor een groot deel uit middelgrof zand bestaat, maar dat deze doorkruist wordt door een aantal storende leem en kleilaagjes en dus behoorlijk heterogeen lijkt. Een flankering van goed doorlatende Pleistocene zanden met minder goed doorlatend Holocene geulafzettingen komt in GeoTOP niet duidelijk naar voren, behalve wellicht enigszins aan de oostrand van het projectgebied.

In het noordelijke deel van het onderzoeksgebied lijkt middenin de Formatie van Peize/Waalre nog een dunne kleilaag aanwezig te zijn, op zo'n 30 tot 25 m diepte (de Waalre klei, Figuur 1-5). In boringen op het vaste land

wordt hier een maximaal 1 meter dikke kleilaag aangetroffen, bij boringen net ten noorden van het voormalige eiland in het Veerse Meer neemt deze dikte toe tot ca. 6 meter. Ook in het zuiden van het gebied wordt bij een enkele boring (B48E0073) hier een zeer dunne kleilaag aangetroffen. De aanwezigheid en dikte van deze laag varieert sterk in het GeoTOP model (Figuur 1-6).



Figuur 1-6. West-oost doorsnede (boven) en noord-zuid doorsnede (beneden) met een schematische weergave van de meest waarschijnlijke lithoklasse in de ondergrond van Wolphaartsdijk afkomstig uit GeoTOP (Stafleu et al., 2013).

Op een diepte van ongeveer 45 a 50 m-mv gaat de Formatie van Peize/Waalre over in een kleilaag behorend aan de Formatie van Oosterhout (Figuur 1-5). De aanwezigheid van deze laag is belangrijk omdat deze opkegeling van dieper, zouter water zou kunnen tegengaan. In GeoTOP model komt deze laag duidelijk naar voren (Figuur 1-6). Boringen tot op deze diepte zijn echter schaars in en rondom het onderzoeksgebied.

2 Opzet veldwerkcampagne

2.1 Boringen en sonderingen

Aan de hand van openbaar beschikbare gegevens is een eerste inschatting van de bodemopbouw gemaakt (zie Paragraaf 1.4.3). Lokaal bestond er echter nog een aanzienlijke onzekerheid over de precieze bodemopbouw. Om hiervan een beter beeld te krijgen zijn boringen en sonderingen uitgevoerd. De nadruk lag hierbij op het in kaart brengen van de volgende onzekerheden:

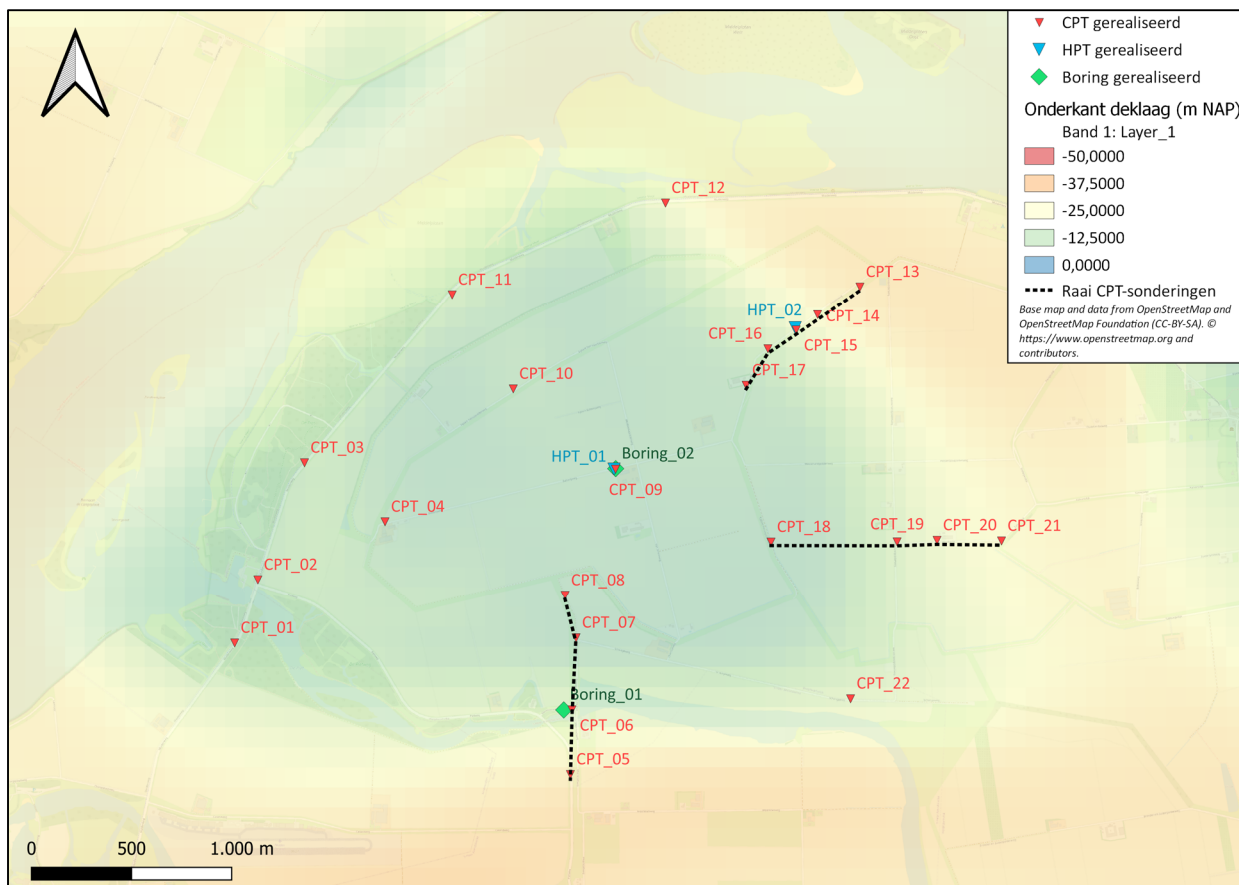
- De precieze ligging van het gebied met de overgang van de Holocene geulafzettingen langs de randen van het voormalige eiland naar de Pleistocene afzettingen en de overgang hierbij in doorlatendheid;
- De doorlatendheid van de zandlagen in het eerste watervoerende pakket en de dikte hiervan;
- De aanwezigheid van kleilagen in het eerste watervoerende pakket, zoals de Waalre Klei;
- De aanwezigheid en dikte van onderliggende Oosterhout Klei.

Om dit in kaart te brengen zijn drie verschillende meetmethoden gebruikt verspreid over het onderzoeksgebied: 2 Boringen, 22 CPT-sonderingen en 2 HPT-sonderingen met mini-pompproef. Een overzicht van de meetlocaties is weergegeven in Figuur 2-1. In de volgende paragrafen worden deze meetmethoden verder toegelicht.

2.1.1 Boringen

De twee boringen zijn uitgevoerd en afgewerkt als monitoringsput door Schijf Grondboringen B.V. Tijdens het boorproces is het opgeboorde materiaal per meter of bij duidelijke overgangen in de lithologie bemonsterd, waaruit een reguliere boorbeschrijving opgemaakt kon worden en de korrelgrootteverdeling van de ondergrond bepaald kon worden om indirect de doorlatendheid te kunnen berekenen. Daarnaast boden de boringen ook de mogelijkheid voor het uitvoeren van boorgatmetingen en het installeren van peilbuisfilters voor het monitoren van de stijghoogte en voor bemonstering van het grondwater ten behoeve van het in beeld brengen van de waterkwaliteit.

De eerste boring (Boring_01) is langs de rand van het voormalige eiland gerealiseerd. De tweede boring (Boring_02) bevindt zich centraal in het gebied (Figuur 2-1). In beide boringen zijn drie peilbuizen met peilbuisfilters op verschillende dieptes geplaatst. Een van de doelen van de boringen was de aanwezigheid en dikte van de Oosterhout Klei in kaart te brengen. Omdat de Oosterhout Klei naar verwachting op 45-50 m-mv zou worden aangetroffen (of niet), zijn beide boringen gezet tot een diepte van 52 m-mv.



Figuur 2-1: Locaties van de uitgevoerde boringen en sonderingen en de diepte van de onderkant van de Holocene deklaag volgens REGIS II, inclusief de raaien t.b.v. het in kaart brengen van de lithologische overgang tussen het gebied met een relatief dunne en een relatief dikke Holocene deklaag (zie Paragraaf 2.1.3).

Het opgeboorde sediment is ongeveer iedere meter bemonsterd en deze monsters zijn gebruikt voor de boorbeschrijvingen. De volledige boorbeschrijvingen van beide boringen zijn opgenomen in Bijlage II. Daarnaast zijn de sedimentmonsters ook gebruikt voor korrelgrootteanalyses, uitgevoerd door het ‘Sediment Laboratory’ van de Vrije Universiteit Amsterdam. Tevens is door TNO een stratigrafische interpretatie en lithologische beschrijving van deze boormonsters gemaakt (voor de uitwerking zie Paragraaf 3.1). De locatie en filterstellingen van de peilbuizen zijn samengevat in onderstaande Tabel 2-1. De peilbuizen zijn gebruikt voor het meten van de stijghoogte en de EGV van het grondwater.

In beide boringen is vervolgens door Deltares ook nog een boorgatmeting uitgevoerd met een elektromagnetische (EM) inductie sonde welke waarmee de gammastraling (een indicatie voor de aanwezigheid van kleilagen) en de geleidbaarheid (een indicatie van het zoutgehalte van het grondwater) zijn gemeten.

Tabel 2-1. Locaties en filterstellingen van de boringen.

	Boring_01	Boring_02
X-coördinaat (RD)	41492	41751
Y-coördinaat (RD)	393484	394691
Maaiveld (m NAP)	2,92	0,72
Diepte filter 1 (m-mv)	10 – 11	17 – 18
Diepte filter 2 (m-mv)	20,5 – 21,5	24,8 – 25,8
Diepte filter 3 (m-mv)	32 – 33	44 – 45

2.1.2 CPT-sonderingen

De 22 CPT-sonderingen ('Cone Penetration Test'), uitgevoerd door Van der Straaten Aannemingsmaatschappij B.V., zijn verspreid over het gebied geplaatst om zo een algeheel beeld te krijgen van de bodemopbouw van het onderzoeksgebied. Als indicatie van het zoutgehalte van het grondwater is bij de sonderingen ook de geleidbaarheid gemeten (EGV).

De einddiepte van de geplaatste sonderingen varieerde tussen de 12 en 34 m-mv. Een belangrijk doel van de sonderingen was om de overgang tussen de Holocene deklaag en de Pleistocene zanden inzichtelijk te krijgen, zowel in de verticaal als in de horizontaal. Doel hiervan is om uit te zoeken of de grootschalige geologische structuur zoals deze naar voren komt in met name REGIS II ook te herkennen is lithologische bodemopbouw zoals bepaald met de sonderingen. Hiertoe zijn sonderingen vooral geplaatst in een drietal raaien loodrecht op de overgang van het gebied met een relatief dunne Holocene afzetting (ter hoogte van het voormalig eiland) naar een relatief dikke Holocene afzetting (de afzettingen in de voormalige geulen rondom het eiland) (Figuur 2-1).

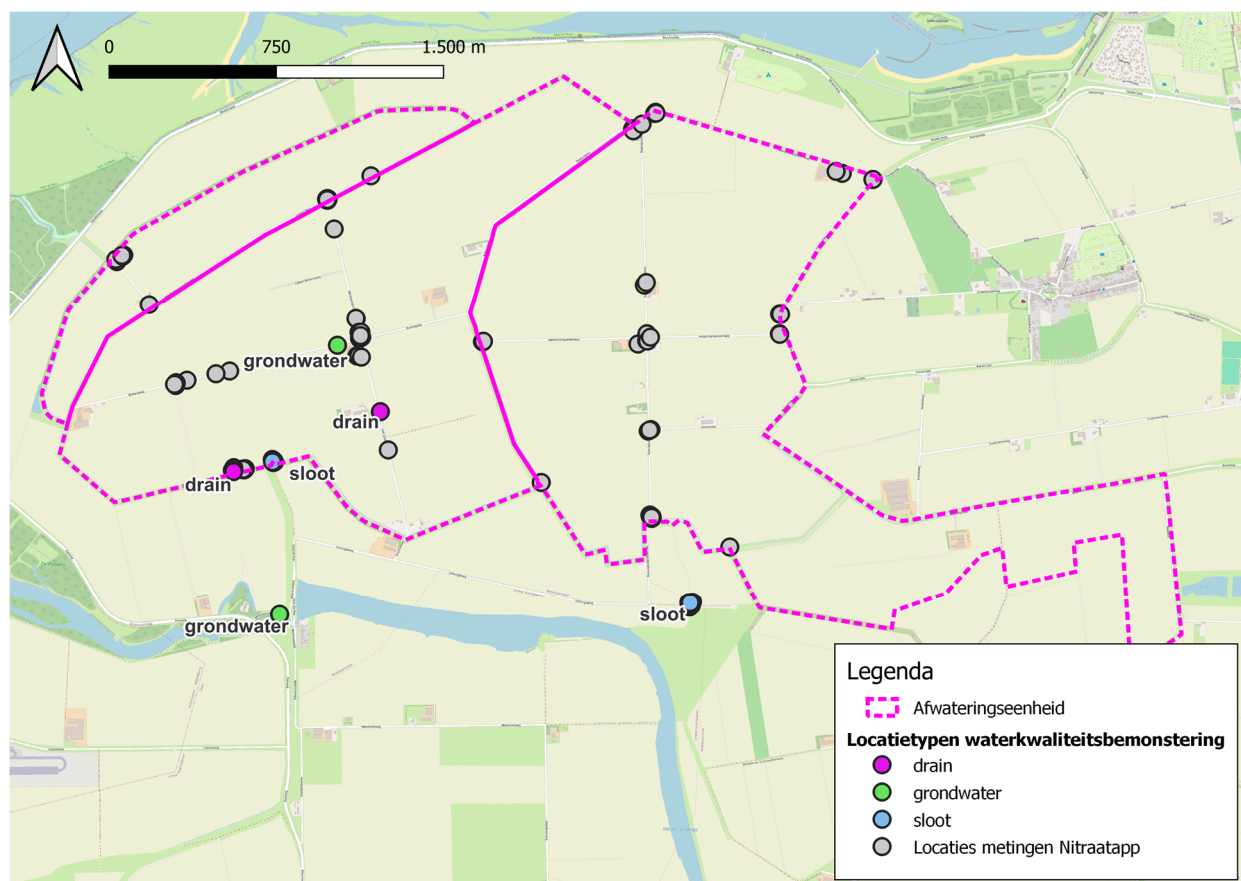
2.1.3 HPT-sonderingen met mini-pompproef

Naast de 22 CPT-sonderingen zijn daarnaast door Fugro NV ook 2 HPT-sonderingen ('hydraulic profiling tool') uitgevoerd: HPT_01 centraal in het onderzoeksgebied en HPT_02 op de noordoostelijke rand van het voormalige eiland. HPT-sonderingen doen in principe dezelfde metingen als de CPT-sonderingen. Daarbovenop wordt er ook tijdens het sonderen een constante hoeveelheid water de grond ingepompt. Dit geeft een indicatie van de relatieve doorlatendheid van de bodem. Bovenop deze HPT-meting zou daarnaast ook op een drietal dieptes per sondering een mini-pompproef (MPT) en anisotrope mini-pompproef (AMPT) worden uitgevoerd. In theorie kan op basis van deze metingen ook de absolute verticale en horizontale doorlatendheid bepaald worden (Berbee et al., 2017). In het veld zijn 5 van de 6 deze metingen echter niet geslaagd. De reden hiervoor was niet geheel duidelijk, maar kan te maken hebben gehad met versmering van de doorboorde klei langs de sondeerstang, waardoor de meet- en injectiepoorten op de sondeerstangen verstopt zijn geraakt.

2.2 Waterkwaliteit

De samenstelling van grond- als oppervlaktewater is een belangrijke factor voor de haalbaarheid van OWB, gezien het de benodigde zuiveringsinspanning voor oppervlaktewater bepaalt en het te verwachten terugwinrendement, en deels ook het ontwerp van de putten. De waterkwaliteitsbemonsteringen binnen het project hadden dan ook als doel een goede toetsing uit te kunnen voeren van de haalbaarheid van infiltratie van oppervlakte- en/of drainwater, vanuit zowel operationeel als juridisch oogpunt. De oppervlaktewaterbemonsteringen zijn steeds aan de instroomzijde van de stuwen Batterijweg en De Kulke uitgevoerd. Drainwater is uit praktische overwegingen bemonsterd op twee locaties omdat er uit deze drains tijdens het veldbezoek water stroomde, terwijl dit voor veel andere drains niet het geval was (zie voor locaties Figuur 2-2). Als laatste is ook een nulmeting bij de nieuwgeplaatste grondwaterputten uitgevoerd, om de grondwatersamenstelling in beeld te brengen en te kunnen vergelijken met de bestaande metingen in gebied.

In totaal zijn er vijf bemonsteringsrondes uitgevoerd tussen 14 December 2022 en 28 Februari 2024. De focus lag hierbij op het winterhalfjaar, omdat dit ook de periode is waarin infiltratie hoofdzakelijk zal plaatsvinden. Omdat dit voor de vergunbaarheid belangrijk is, is bij één van de bemonsteringsrondes ook een uitgebreide meting van de aanwezige bestrijdingsmiddelen uitgevoerd (door AL-West) op een lijst van in totaal 98 relevante stoffen. De analyses voor de chemische samenstelling van het water zijn uitgevoerd door Aqualab Zuid, alleen ATP (een microbiologische meting) is op het lab van KWR zelf gedaan. Bij de bemonstering zijn in het veld ook steeds de geleidbaarheid, de pH, de temperatuur en de troebelheid van het water gemeten met handsensoren.



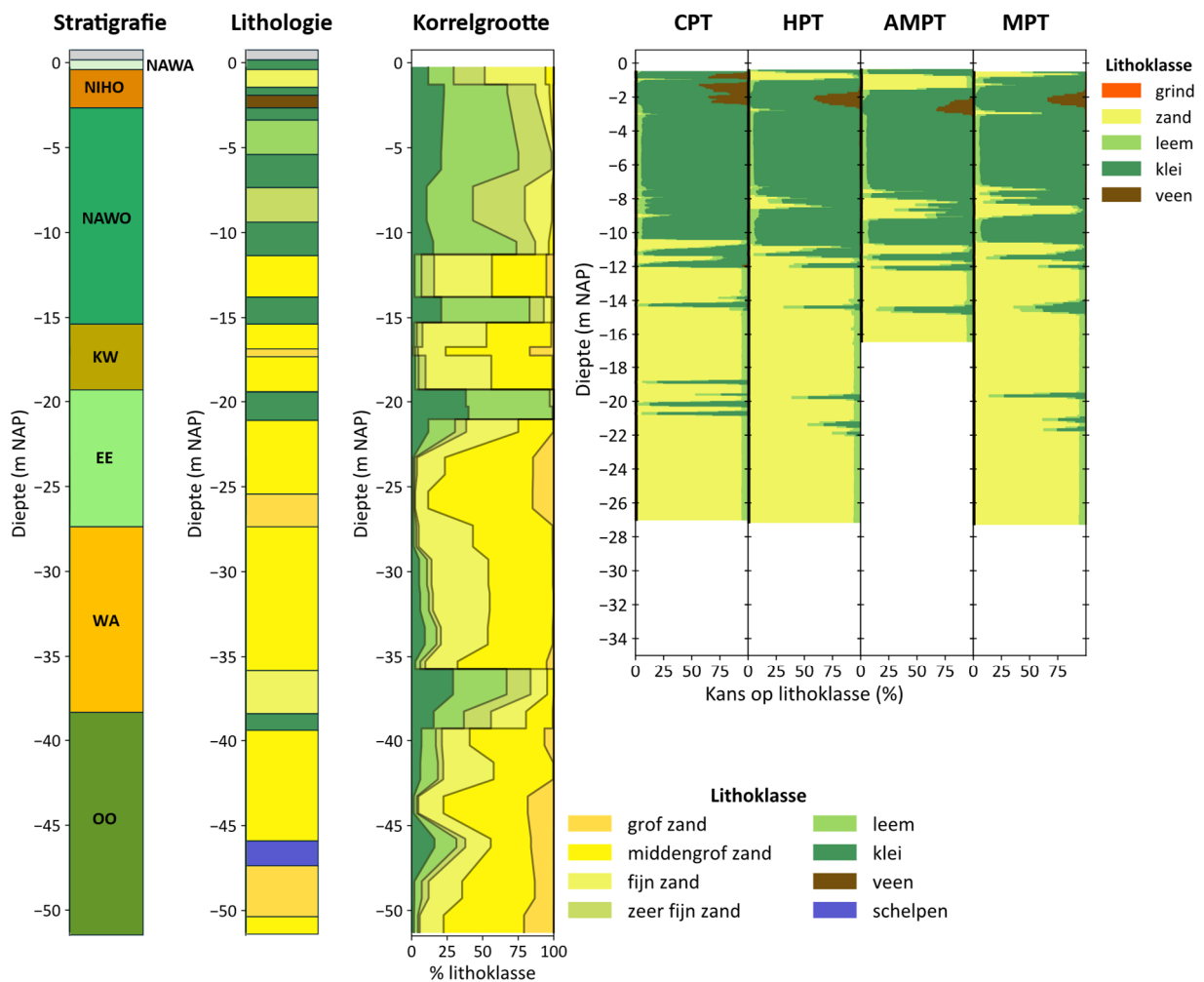
Figuur 2-2. Locaties waar de binnen het project uitgevoerde waterkwaliteitsmetingen verricht zijn, plus de locaties van de metingen verricht door de agrariërs in het gebied met behulp van de Aquality App (voorheen Nitraat App).

Bovenop de door KWR zelf verrichte metingen is door de Provincie Zeeland meetapparatuur verspreid onder een aantal van de betrokken agrariërs waarmee zij op eenvoudige wijze EC-metingen konden verrichten van het oppervlaktewater. De meetresultaten zijn opgeslagen en gedeeld via de door Deltares ontwikkelde [Aquality App](#) (voorheen Nitraat App). In de bijbehorende [web-based viewer](#) worden de meetmomenten en -locaties, de EC-waarde en een daaruit volgende inschatting van de chlorideconcentratie weergegeven. De data binnen het projectgebied is vervolgens uit de database van de Aquality App gehaald. De locaties waarop deze metingen zijn uitgevoerd zijn ook te zien in Figuur 2-2.

3 Bodemopbouw en geohydrologie

3.1 Stratigrafie, lithologie en vergelijking meetmethoden

Voor de algemene beschrijving van de bodemopbouw in het gebied is ten eerste gekeken naar de locatie van Boring_02, HPT_01 en CPT_09, centraal in het projectgebied (Figuur 2-1). Omdat de drie verschillende meetmethoden hier op dezelfde locatie uitgevoerd zijn, geeft deze locatie het meest complete beeld van de bodemopbouw en kunnen de meetmethoden met elkaar worden vergeleken. De uitwerking van deze metingen is afgebeeld in Figuur 3-1.



Figuur 3-1. Interpretatie van de verschillende metingen uitgevoerd op de locatie van Boring_02, CPT_09 & HPT_01. V.l.n.r. de stratigrafische interpretatie van de boormonsters en de lithologische beschrijving van de boormonsters (door TNO), de lithoklassen in het sediment op basis van de korrelgrootteverdeling van de boormonsters en de interpretatie van de CPT, HPT, AMPT en MPT sonderingen. Afkortingen voor de stratigrafie: NAWA = Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren, NIHO = Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket, NAWO, Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Wormer, KW = Formatie van Koewacht, EE = Eem Formatie, WA = Formatie van Waalre, OO = Formatie van Oosterhout.

De linker 3 kolommen in Figuur 3-1 betreffen de uitwerking van de boring met de stratigrafische interpretatie, de lithologische beschrijving en de lithoklasse-fracties op basis van de korrelgrootteverdeling. Bij de boring zijn in de eerste 16 meter Holocene pakketten aangetroffen, bestaande uit een dunne fijnzandige laag genaamd het Laagpakket van Walcheren, een dunne veenlaag van het Hollandveen en een ca. 13 meter dikke afzetting van het Laagpakket van Wormer. De laatste bestaat in de bovenste 5 meter voornamelijk uit klei en leem, terwijl de onderste 8 meter bestaan uit een afwisseling van zand- en kleilagen.

Onder deze Holocene lagen bevinden zich de Pleistocene zandlagen van de Formatie van Koewacht en de Eem Formatie, die gescheiden worden door een kleilig pakket. De Boxtel Formatie, die volgens REGIS II (Vernes & van Doorn, 2005) zich direct onder de Holocene pakketten zou moeten bevinden (zie bijv. Figuur 1-5) komt uit de boormonsters niet naar voren. Onder de Eem Formatie bevindt zich de Formatie van Waalre. De Waalre Klei ontbreekt hier als overgang tussen deze twee formaties. Samen vormen deze formaties een over het algemeen grofzandig pakket van ca. 15 meter dik.

De Oosterhout Klei aan de bovengrens van de Oosterhout Formatie is wel aangetroffen, op ca. 37-39 m-NAP. Dit is een stuk ondieper dan de verwachte diepte van ca 45 tot 50 m-NAP, waarop de diepte van de boring was bepaald. Onder deze Oosterhout Klei bevinden zich middengrof tot grofzandige pakketten van de Oosterhout Formatie, onderbroken met ten minste 1 schelpenlaag.

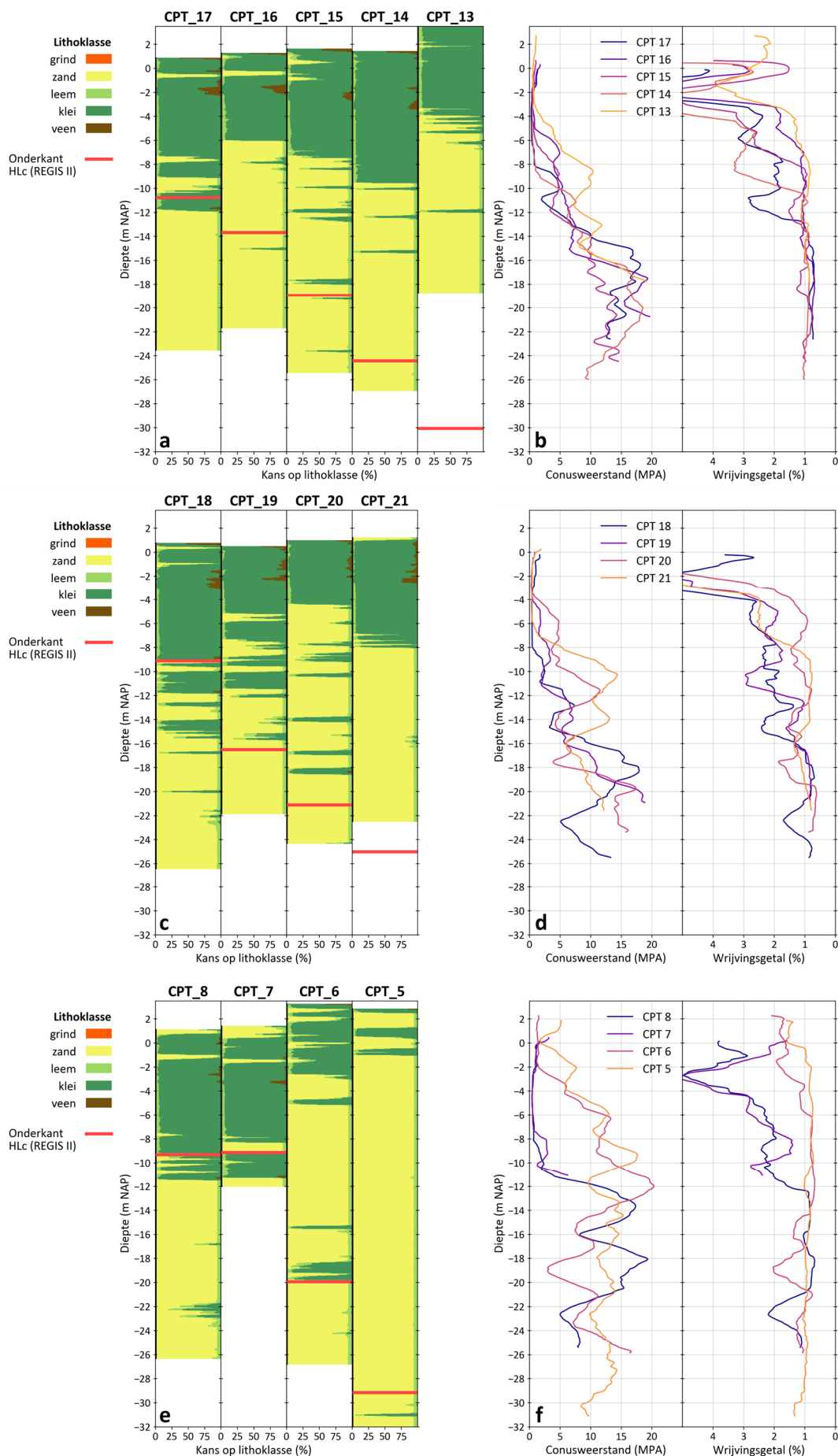
De rechter vier kolommen in Figuur 3-1 tonen de interpretatie van de sonderingen; de meest linker voor CPT_09, de rechter 3 voor de sonderingen voor de 3 metingen uitgevoerd rondom de HPT met mini-pompproef. Voor de interpretatie van de sonderingen is gebruik gemaakt van het door CEMS Crux Engineering MicroServices BV ontwikkelde CPT Core (Pippi et al., 2022). Met deze module is op iedere diepte de kans dat een bepaald lithoklasse (grind, zand, leem, klei of veen) voorkomt bepaald.

Uit Figuur 3-1 blijkt dat de sonderingen en boring met de gebruikte interpretatiemethodes een eenduidig beeld geven over de ondergrond op deze locatie; alle verschillende zand- en kleilagen zijn bij iedere methode gedetecteerd en daarnaast bevinden deze zich ongeveer op dezelfde diepte. Met de huidige interpretatiemethode lijkt het dus net zo goed mogelijk het onderscheid tussen zandige en kleiige lagen te maken uit de relatief goedkope CPT-sonderingen als met de boringen. Wel is het verschil in resolutie zichtbaar: voor de sonderingen is er iedere centimeter een meetwaarde, terwijl de boringen zijn bemonsterd per meter of meer. Hierdoor lijken de kleilagen onder aan het Laagpakket van Wormer en bovenaan de Eem Formatie op basis van de boringen 1 á 2 meter dik te zijn, terwijl deze op basis van de sonderingen bestaan uit één of meerdere laagjes van enkele tientallen centimeters.

3.2 Invloed ontstaansgeschiedenis van Wolphaartsdijk op geohydrologie op gebiedsschaal

Een van de vragen met betrekking tot de geohydrologie die bij aanvang van deze studie voorlag was in hoeverre de geschiedenis van het huidige Wolphaartsdijk (Paragraaf 1.4.2) van invloed is geweest op de geologische opbouw en of er bij de beschouwing van de mogelijkheden voor ondergrondse waterberging rekening gehouden moest worden of zelfs gebruik gemaakt zou kunnen worden van de resulterende doorlatendheidsverschillen. Zoals beschreven in Paragraaf 2.1.2, is een drietal raaien van CPT-sonderingen loodrecht op de locatie van de rand van het oorspronkelijke eiland uitgevoerd, om het verloop van de bodemopbouw te kunnen onderzoeken. De locaties van deze raaien zijn weergegeven in Figuur 2-1.

In Figuur 3-2 is aan de linkerkant de interpretatie van de raaien van de CPT-sonderingen weergegeven. Ook is de verwachte diepte van de onderkant van de Holocene afzettingen op basis van REGIS II (Vernes & van Doorn, 2005) gegeven. Rechts zijn voor dezelfde raaien de conusweerstand en wrijvingsgetallen over elkaar heen gelegd. Om structurele veranderingen van de lithografie langs de raaien inzichtelijk te krijgen, en kleinschalige heterogeniteit en meetartefacten eruit te halen, zijn de afgebeelde waarden het voortschrijdend gemiddelde van ieder punt op een gegeven diepte +/- 1 meter.



Figuur 3-2: Links (a-c-e); meest waarschijnlijke lithoklasse van de CPT-sonderingen langs de drie raaien in Figuur 3-1 op basis van interpretatie met het CPT Core model. De einddiepte van de Holocene deklaag op basis van REGIS II is ook gegeven. Rechts (b-d-f); Conusweerstand en wrijvingsgetal over de diepte voor de sonderingen de raaien in Figuur 3-1. Afgebeelde waarden zijn het voortschrijdend gemiddelde op ieder punt in de diepte +/- 1 meter.

Volgens de interpretatie van GEOTOP (Stafleu et al., 2013) zouden tot de onderkant van de Holocene afzettingen meer leem- en kleiafzettingen aanwezig moeten zijn dan in de onderliggende Pleistocene zanden. In dat geval zou dus verfijning moeten optreden van de binnenkant van de grootschalige structuur (links in alle drie de figuren in Figuur 3-2) naar de buitenkant (rechts), wat betekent dat de kans op het voorkomen van klei en leem in het dieptetraject van grofweg 10 tot 30 meter zou moeten toenemen. Op basis van de figuren links in Figuur 3-2 is dit echter niet het geval. Langs alle drie de raaien beginnen de zandige pakketten zelfs ondieper buiten de structuur dan erbinnen.

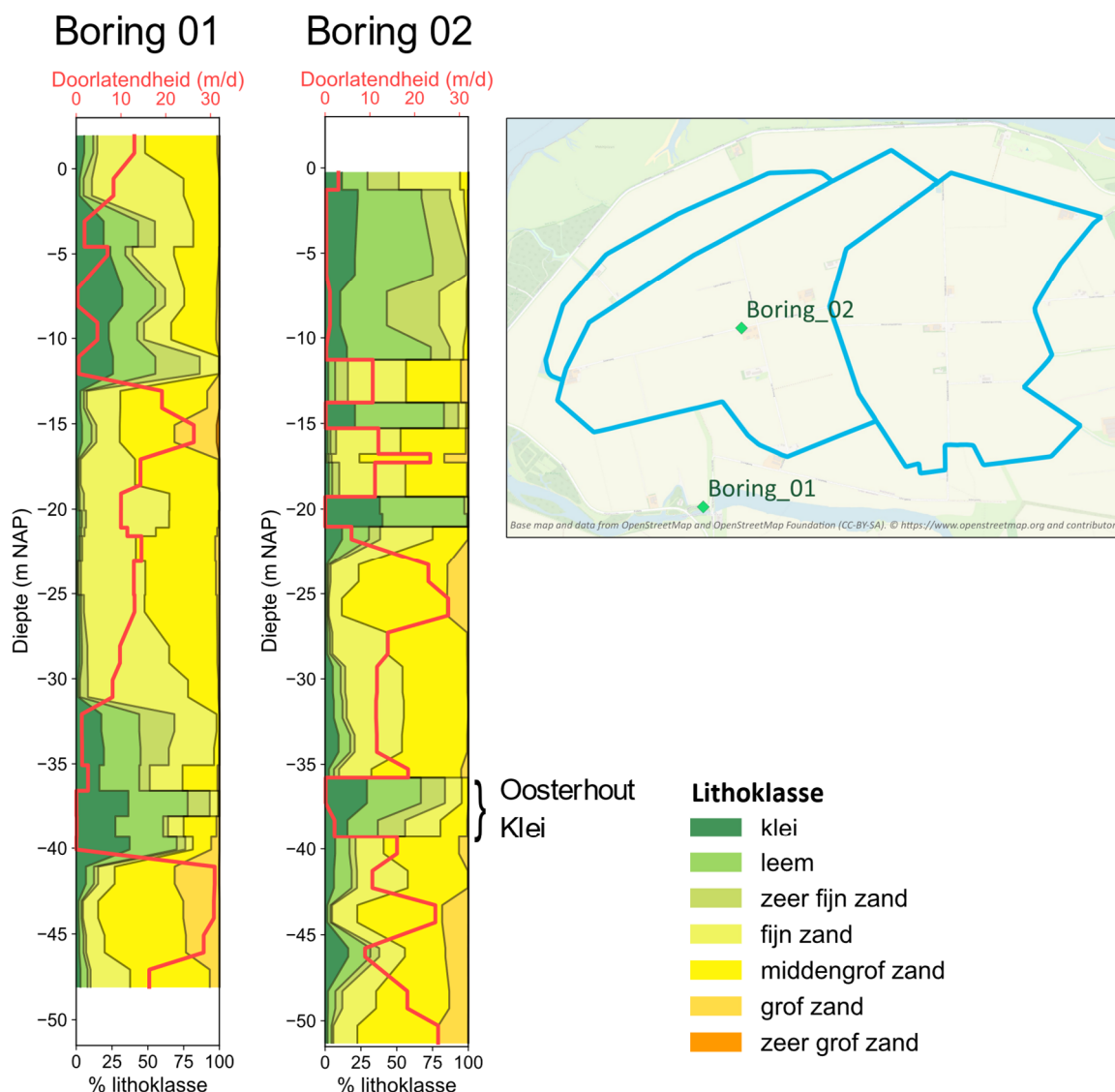
Over het algemeen geldt dat het sediment grover wordt bij een hogere conusweerstand en lager wrijvingsgetal (naar rechts in de figuren). Wanneer het wrijvingsgetal lager is dan 2, is er in de regel sprake van zand. Als er sprake zou zijn van een overgang van een (grof-)zandiger pakket binnen de structuur naar een meer laagdoorlatend formatiemateriaal buiten de structuur in het dieptetraject -10 - -30 m NAP, zou er dus een duidelijk patroon zichtbaar moeten zijn van een lage naar een hoge conusweerstand en van een hoog naar een laag wrijvingsgetal langs de sonderingen van een raai. Van een dergelijk patroon is echter geen sprake langs de raaien rechts in Figuur 3-2. Op basis van zowel een lithologische interpretatie als van de ruwe data hoeft of kan er voor het gebied als geheel dus geen rekening gehouden te worden met invloed van een duidelijke 'rand' van het oorspronkelijke eiland, noch een hierbij horende overgang van Pleistocene naar Holocene afzettingen.

3.3 Geohydrologische parametrisering

In Figuur 3-3 is de lithologie van de ondergrond op basis van de korrelgrootteverdeling van de boormonsters weergegeven voor beide boringen. Bij Boring 01 ligt de onderkant van de deklaag op ca. -13 m NAP. Op deze locatie is de deklaag vrij zandig doordat deze boring zich in de kreekrugafzettingen ten zuiden van het studiegebied bevindt. Hieronder loopt het eerste watervoerende pakket ononderbroken door tot aan de Oosterhout Klei op 36 m-NAP (vanaf 32 m-NAP wordt het zand al kleiiger). Op de locatie van Boring 02, midden in het studiegebied, is de overgang van deklaag naar het eerste watervoerende pakket grilliger. De deklaag is hier aanwezig tot -11,3 m NAP. Tussen de deklaag en de Oosterhout Klei bevinden zich hier echter nog twee dunne kleilagen, op ongeveer -14,5 en -20 m NAP, waardoor het eerste watervoerende pakket hier is opgesplitst in 2 dunne zandlagen van ca. 2,5 en 4 meter dik bovenin de aquifer en een zandpakket van ca. 14 meter dik tot aan de Oosterhout Klei op ca. -35,8 m NAP.

Een dergelijk patroon van meerdere kleilagen die het zandpakket van het eerste watervoerende pakket doorsnijden wordt aangetroffen in een groot deel van het gebied (Figuur 3-4). In sommige gevallen is er, net zoals bij Boring 01, wel sprake van een doorlopende zandlaag vanaf -10 á -12 m NAP (CPT_12, CPT_20 & CPT_21 in Figuur 3-3). In andere gevallen, zoals CPT_10 in Figuur 3-3, zijn er geen ononderbroken zandlagen van meer dan 2 m dikte aanwezig tot op -20 m NAP. De diepte en dikte van de deklaag en de aanwezigheid van hieronder gelegen kleilagen varieert sterk tussen de verschillende sonderingen, zelfs voor sonderingen die dicht bij elkaar in de buurt liggen (zie ook Figuur 3-2). Vermoedelijk betreft dit dus veelal lokale kleilagen.

De aanwezigheid van deze kleilagen is voornamelijk van belang om op een locatie te bepalen welk deel van de ondergrond, boven de Oosterhout Klei, effectief gebruikt kan worden voor ondergrondse waterberging en waar in het eerste watervoerende pakket dus putfilters geplaatst kunnen worden. Op sommige locaties kan dit vermoedelijk vanaf -12 m NAP (CP12, CPT_20 & CPT_21), op andere locaties pas vanaf -20 m NAP (CPT_10). Ook zijn er locaties, zoals bij CPT_09 (= Boring 02) en CPT_08, waar het wellicht mogelijk is ook filters tussen de kleilagen in te plaatsen. De daadwerkelijke filterstelling die gebruikt kan worden voor ondergrondse waterberging is dus sterk locatie-afhankelijk en zal op enige afstand van de sondeerlocaties niet goed bij voorbaat te voorspellen zijn.



Figuur 3-3. Lithoklasse op iedere diepte van beide boringen op basis de korrelgrootteverdeling van de genomen boormonsters en geschatte doorlatendheid van het sediment op basis van de Kozeny-Carman vergelijking (rode lijn).

Voor een OWB-systeem wordt idealiter de gehele dikte van de opslaglaag tussen onder en boven- en onderliggende afsluitende weerstandslagen gebruikt. Om aan de haalbaarheid hiervan te kunnen rekenen is het nodig doorlatendheden in te schatten voor de verschillende relevante lagen die hierboven omschreven zijn. Voor beide boringen is dus aan de hand van de mediane korrelgrootte een inschatting gemaakt van de doorlatendheid van de ondergronds, op basis van een empirische afgeleide van de Kozeny-Carman vergelijking (Bear, 1972):

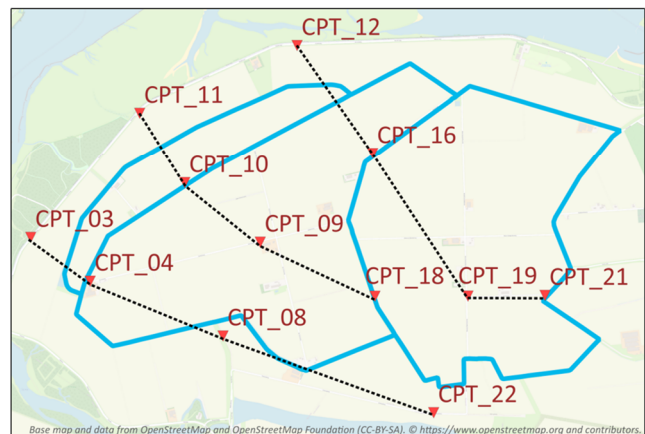
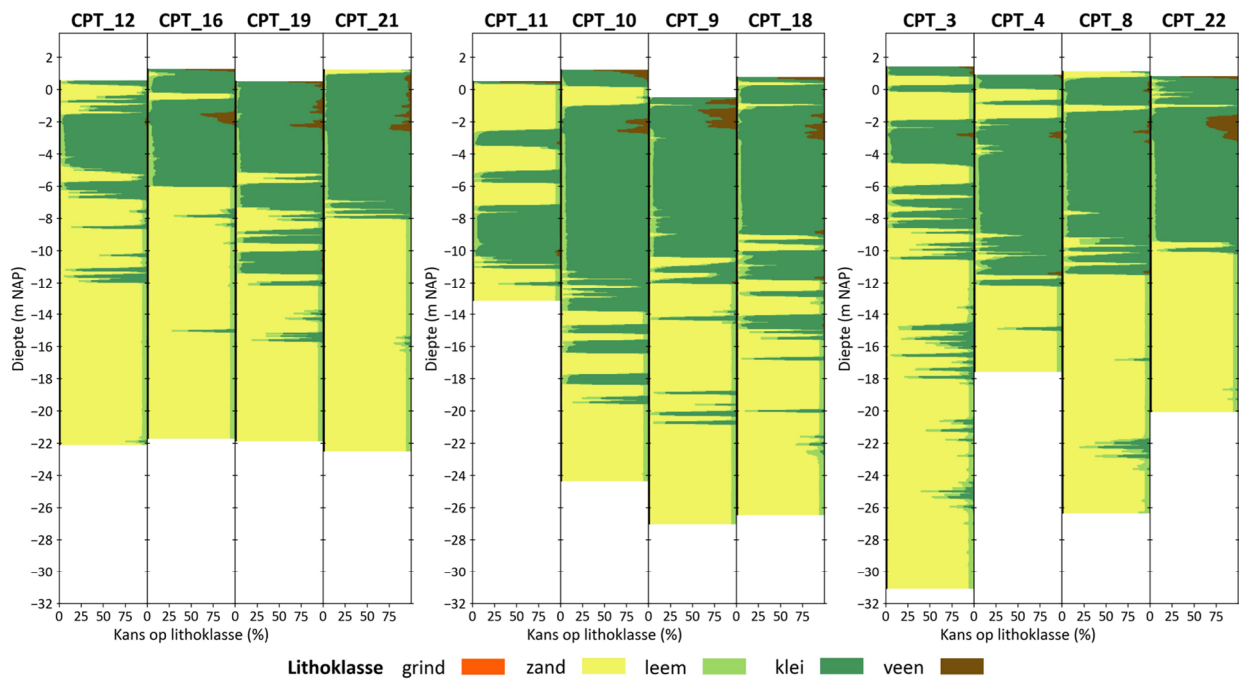
$$K_h = \frac{\rho g}{\mu} \frac{D_{50}^2 n_e^3}{180(1-n_e)^2}$$

Met:

- K_h Horizontale doorlatendheid [$m d^{-1}$]
- ρ De dichtheid van water [$kg m^{-3}$]
- g Valversnelling ($9,81 m s^{-2}$)
- μ Dynamische viscositeit van water [$Pa s$]
- n_e Effectieve porositeit van het sediment [-]
- D_{50} Mediane korrelgrootte [mm]

Hierbij zijn standaardwaarden aangenomen voor ρ van 1000 kg/m^3 , μ van $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$ en n_e van 0,3. De hieruit volgende doorlatendheid over de diepte is voor beide boringen afgebeeld in Figuur 3-3 (de rode lijnen in dit figuur).

De doorlatendheid in het eerste watervoerende pakket varieert tussen 6 en 27 m d^{-1} en is gemiddeld ongeveer 15 m d^{-1} . Uit Figuur 3-3 blijkt dat op beide locaties het tweede watervoerende pakket, onder de Oosterhout Klei, iets grofzandiger dan het eerste watervoerend pakket. Het tweede watervoerend pakket is grofzandiger en heeft daardoor een wat hogere doorlatendheid, met name op de locatie van Boring 01.



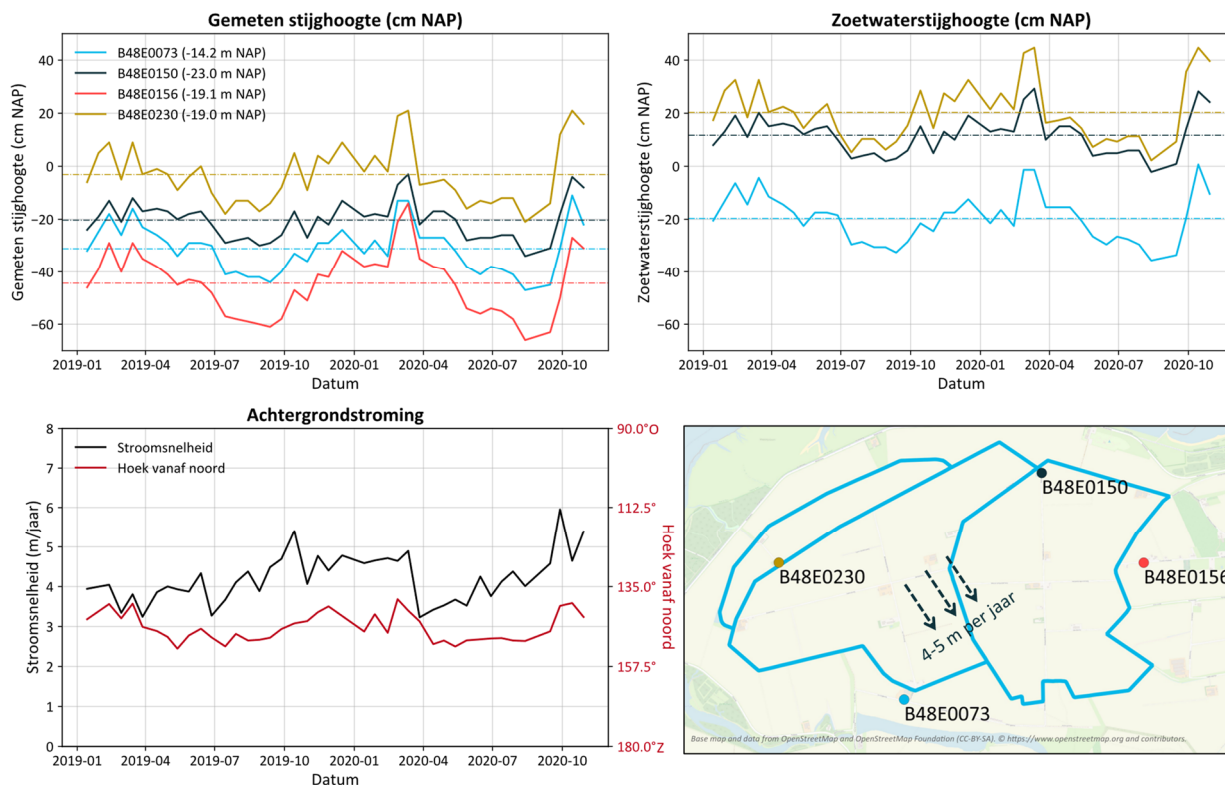
Figuur 3-4. Meest waarschijnlijke lithoklasse van 16 CPT-sonderingen verspreid over het gebied op basis van interpretatie met het CPT-core model.

3.4 Grondwaterstroming

3.4.1 Horizontaal

In een viertal peilbuizen in en nabij het onderzoeksgebied wordt nog actief de grondwaterstand gemeten door de Provincie Zeeland. De locaties van deze peilbuizen en de gemeten grondwaterstanden in de ondiepste filters tussen januari 2019 en oktober 2020 zijn weergegeven in Figuur 3-5. De grondwaterstand in het gebied ligt over het algemeen tussen 0 tot -0,5 m NAP en fluctueert in iedere peilbuis ca. 40 cm tussen zomer en winter. In het westen van het gebied, met sterkere beïnvloeding door het Veerse Meer, is de stijghoogte ongeveer een halve meter hoger dan in het oosten van het gebied.

Om een inschatting te krijgen van de grondwaterstroming in een gebied met zout grondwater, is het nodig de gemeten stijghoogtes te corrigeren voor de dichtheid van het grondwater. Om deze reden is aan de hand van de gemiddeld gemeten chlorideconcentraties op deze locaties (zie ook Paragraaf 4.2.1) de zoetwaterstijghoogte berekend volgens Post et al. (2007) voor een referentiediepte van -19 m NAP. Voor peilbuis B48E0156 waren geen metingen van de chlorideconcentraties beschikbaar; hiervoor kon daarom geen zoetwaterstijghoogte worden bepaald.



Figuur 3-5. Linksboven: Gemeten stijghoogtes in de bemeeten peilbuisfilters in de periode januari 2019 – oktober 2020. Gegeven diepten zijn de gemiddelde diepten van de peilbuisfilters. Rechtsboven: Zoetwaterstijghoogte op basis van gemeten stijghoogte en gemiddeld gemeten chlorideconcentraties op een referentiediepte van -19 m NAP. Stippellijnen zijn de gemiddelde waarden van de gegeven periode. Linksonder: berekende snelheid en hoek van de achtergrondstroming t.o.v. het noorden (met de klok mee) berekend op basis van de zoetwaterstijghoogtes. Rechtsonder: peilbuislocaties en indicatie van de achtergrondstroming.

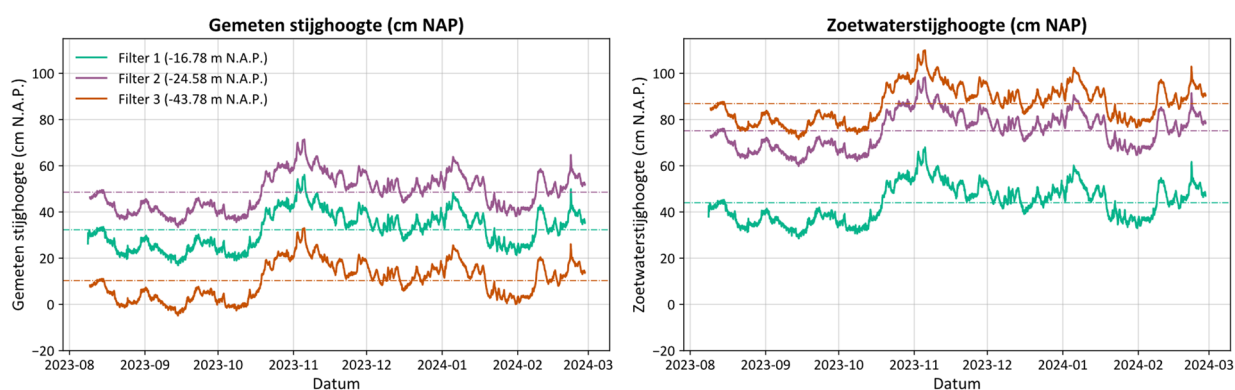
Triangulatie van de zoetwaterstijghoogten in deze 3 peilbuizen geeft een indicatie van de achtergrondstromingssnelheid en -richting en het verloop hiervan over de tijd (Figuur 3-5, linksonder). Op basis van een doorlatendheid van 15 m/d en een porositeit van 0,3 is de gemiddelde stroomsnelheid 4,2 m/jaar, en fluctueert deze gedurende de meetperiode tussen de 3,2 en 6,0 m/jaar. De grondwaterstromingsrichting is zuidoostelijk tot zuidzuidoostelijk, met een met beperkte temporele variatie (139°– 152°N). De

grondwaterstroming wordt dus primair beïnvloed door het hogere waterpeil in het Veerse Meer (rond 0,0 mNAP) t.o.v. het peil in de achterliggende polders en de Westerschenge (tot minder dan -1,0 mNAP).

3.4.2 Verticaal

In het studiegebied is het oppervlaktewater in de zomer over het algemeen brak. Dit duidt erop dat op zijn minst in een deel van het gebied kwel plaatsvindt vanuit het diepere grondwater richting het oppervlaktewater en dus verticale stroming richting het maaiveld. Op basis van de stijghoogtemetingen in de peilbuis aan de Batterijweg, op de locatie van Boring 02 (voor de locatie zie Figuur 3-3), is onderzocht of de kweldruk ook in de praktijk waarneembaar is. Deze metingen zijn weergegeven in Figuur 3-6. Links zijn de door de loggers gemeten stijghoogtes, gecorrigeerd voor de diepte van de loggers, weergegeven. Rechts de op basis van deze metingen berekende zoetwaterstijghoogtes. Hierbij is gebruik gemaakt van de methoden van Post et al. (2007) en de gemeten chlorideconcentraties in de peilbuisfilters (zie Paragraaf 4.2.1).

Uit de berekende zoetwaterstijghoogtes blijkt dat er inderdaad sprake is van een kweldruk in het gebied. De hoogste zoetwaterstijghoogte is namelijk waargenomen in het diepste filter (Filter 3), en de laagste in het ondiepste filter (Filter 1). Opvallend is het relatief grote verschil in zoetwaterstijghoogte tussen Filter 1 en Filter 2, die relatief dicht bij elkaar zitten. Tussen deze filters is een kleilaag aanwezig (Figuur 3-1), wat een dempende werking heeft op de daadwerkelijke kwelflux en dus aangeeft dat deze laag op deze locatie een aanzienlijke weerstand moet hebben.



Figuur 3-6. Links: Gemeten stijghoogtes in de peilbuis op de locatie van Boring 02 in de verschillende peilbuisfilters. Rechts: Zoetwaterstijghoogte op basis van gemeten stijghoogte en gemiddeld gemeten chlorideconcentraties. Meetperiode: Augustus 2023 tot februari 2024. Stippellijnen zijn de gemiddelde waarden van de gegeven periode. Peilbuislocatie bij Boring 02 is weergegeven in Figuur 3-4. Gegeven diepten zijn de gemiddelde diepten van de peilbuisfilters.

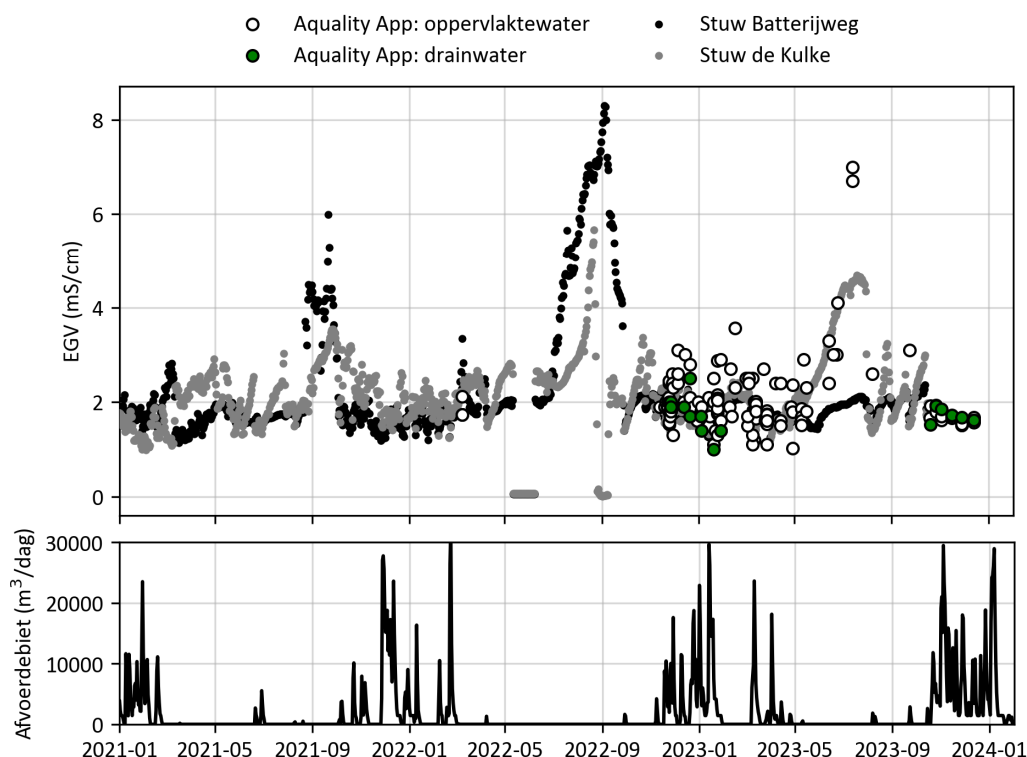
4 Waterkwaliteit

Monsters voor waterkwaliteitsanalyse zijn genomen van oppervlaktewater (bij beide stuwen), van drainwater (op 2 locaties) en van het grondwater (in de drie peilfilters van beide grondwaterputten), zoals omschreven in Paragraaf 2.2. Over de vier bemonsteringsrondes gezien gaat het om in totaal 20 monsters. De volledige analysesresultaten zijn te zien in Tabel 4-1, met uitzondering van de resultaten voor de analyse van de bestrijdingsmiddelen, welke apart worden behandeld.

4.1 Oppervlaktewater

4.1.1 Zoutgehalte

Een indicator van het zoutgehalte van het uit het gebied afstromende water wordt door het waterschap bij beide stuwen continue gemeten in de vorm van de geleidbaarheid (ook wel EGV - Elektrisch Geleidingsvermogen). Data van deze metingen is beschikbaar voor de periode december 2020 tot januari 2024. In die periode schommelde de EGV in de winters grotendeels tussen de 1,5 en 2,5 mS/cm (Figuur 4-1). Uit de waterkwaliteitsbemonstering blijkt dat er bij dergelijke lage zoutgehaltes geen sterk verband is tussen de gemeten chlorideconcentratie en de geleidbaarheid (Figuur 4-2, links), en de bij de stuwen gemeten geleidbaarheid kan in dit bereik dus niet betrouwbaar vertaald worden naar een chlorideconcentratie.

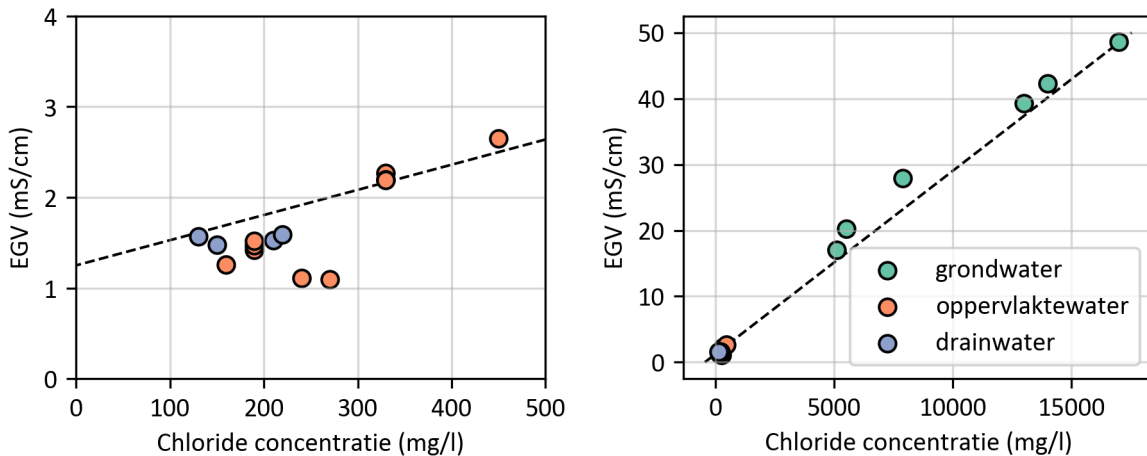


Figuur 4-1. Boven: Geleidbaarheid (EGV) van het uit het projectgebied afgevoerde oppervlaktewater bij de stuwen Batterijweg en de Kulke, samen met de door de agrariërs zelf uitgevoerde veldmetingen in de 'Aquality App'. Onder: de dagelijkse afvoer bij stuw de Batterijweg in dezelfde periode.

Tabel 4-1. Analyseresultaten van de waterkwaliteitsbemonsteringen die binnen het project uitgevoerd zijn. Waarde voor de operationele richtlijn zijn op basis van Beernink & van der Schans (2023). De verschillende bemonsteringslocaties zijn te zien in Figuur 2-2 en de dieptes van de gebruikte peilfilters voor grondwaterbemonstering in Tabel 2-1.

Parameter	Wetgeving (infiltratiebesluit)	Operationele richtlijn (putverstopping)	Oppervlakte water										Drainwater				Grondwater					
			De Kulke					Batterijweg					Drain 1			Drain 2	B1 F1	B1 F2	B1 F3	B1 F1	B1 F2	B1 F3
			14-12-2022	15-2-2023	19-4-2023	9-8-2023	28-2-2024	14-12-2022	15-2-2023	19-4-2023	9-8-2023	28-2-2024	14-12-2022	15-2-2023	28-2-2023	28-2-2023	8-8-2023	8-8-2023	8-8-2023	8-8-2023	8-8-2023	8-8-2023
Veldparameters																						
Temperatuur (°C)			2,0	4,9	10,5	16,8	8,2	1,1	5,4	10,9	17,5	6,5	7,5	7,2	7,3	8,2	12,2	12,1	12,1	12,3	12,2	12,0
EGV veld (mS/cm)			2,3	2,2	1,1	1,4	1,3	2,2	2,7	1,1	1,5	1,5	1,5	1,6	1,5	1,6	20,2	42,3	48,6	17,0	27,9	39,3
pH veld (-)			7,7	7,9	7,8	7,3	7,4	7,9	7,8	7,7	7,4	7,5	9,3	7,4	7,8	7,3	7,7	7,5	7,2	7,0	7,1	7,1
Parameters die putverstopping veroorzaken																						
Troebelheidsgraad		1	14,9	11,4	3,55		0,65	32	3,12	3,55		13,09	0,7	1,1	5,5	1,83						
TSS (mg/l)		0,1	16	9,9	4,5	8,3	13	28	3,7	2	2,6	7,3	<2	<2	2,3	<2						
Ijzer, opgelost (ug/l)		10	370	14	19	30	13	17	34	140	46	26	<5	25	12	<5						
Ijzer, totaal (ug/l)					150	370	610	650	250		140	210	12	<5	22	6,4						
DOC (mg/l)		2	9,5	11	10	12	7,3	8,9	9,4	9,4	8,2	6,4	6,6	5,8	10	4,5	8,1	4,9	4,2	14	12	9,6
ATP (pg/ml)		10				160	70				170	140			15	13						
Overige chemische parameters																						
pH lab (-)			7,56	7,74	7,85	7,31	7,65	7,63	7,66	7,82	7,4	7,66	7,34	7,73	7,31	7,26	7,55	7,19	6,96	6,91	6,95	6,93
Ammonium (mg/l)	2,5		0,2	0,13	0,058	0,23	0,066	0,29	0,088	0,071	0,26	0,056	<0,05	<0,05	0,16	<0,05	4,4	2	4,2	36	29	15
Calcium (mg/l)				180	170	140	140	240		150	160	150	180	180	150	150	210	370	410	690	490	570
Bicarbonaat (mg/l)				550		390	550		550		420	500		500	620	510	680	710	370	870	720	800
Chloride (mg/l)	200		330	330	240	190	160	330	450	270	190	190	210	220	150	130	5500	14000	17000	5100	7900	13000
Magnesium (mg/l)					40	24	28	33	46		17	20	14	16	16	11	510	930	1100	370	510	930
Nitraat (mg/l)	5,6		22	4,5	9,6	41	24	38	2,7	13	61	21	21	17	19	22	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Nitriet (mg/l)							0,048					0,1			0,098	0,066						
Ortho-phosfaat					0,035	0,31	0,14	0,033	0,044		0,12	0,059	0,054	0,07	0,13	<0,01	2,3	0,026	0,69	<0,02	<0,02	0,24
Sulfaat (mg/l)	150		220	190	140	110	97	200	210	110	74	86	95	65	36	47	1100	2000	2100	140	870	1100
Aluminium (ug/l)			<3		110	310	800	340	21		34	170	7,8	<3	7,3	11	<60	<300	<300	<30	<150	<150
Bromide (mg/l)				-	0,96	0,72	0,69	1,3	1,9		0,75	0,78	0,8	0,84	0,65	0,49	22	51	61	20	33	49
Cadmium (mg/l)	0,4						<0,2					<0,2		<0,05	<0,05							
Koper (ug/l)	15						<5					<5		3,8	2,4							
Arseen (ug/l)					16	6,6		1,9		3,8	2,7		1,9	3,6	0,76	62	<50	<50	12	<25	<25	
Lood (ug/l)	15					<1						<1		<0,5	<0,5							
Mangaan (ug/l)			52	48	56	53	75		22	64	36	<0,5		44	7,6	200	430	170	700	290	150	
Natrium (mg/l)	120		220	170			190		170				120			3500	8300	9400	2300	5000	7000	

Duidelijke uitschieters boven deze bandbreedte zijn te zien in de zomers, en met name in de zomer van '22 toen de EGV opliep tot boven de 8 mS/cm bij Stuw Batterijweg. Bij dergelijk hoge zoutgehalten is het verband tussen de chlorideconcentratie en de EGV wel betrouwbaar (Figuur 4-2, rechts). Op basis van de relatie tussen beide in De Louw et al. (2013) komt 8 mS/cm overeen met een chloride concentratie van ongeveer 2400 mg/l. Dit duidt op een significante fractie zout kwelwater in de sloten, maar kan ook deels het gevolg zijn van sterke verdamping gezien de uitstroom over de stuwen in de zomers nagenoeg nul is. Opvallend is verder dat het chloride gehalte bij beide stuwen in de zomers niet per se gelijk oploopt: bij Stuw de Kulke was het water in de zomers van '21 en '23 zouter dan bij de Batterijweg, terwijl dit in de zomer van '22 juist andersom was.



Figuur 4-2. Verhouding tussen de bij de waterkwaliteitsbemonstering gemeten chlorideconcentratie en de geleidbaarheid (EGV). De gestreepte lijn geeft de verwachte verhouding weer (bron: De Louw et al., 2013).

De geleidbaarheidsmetingen die zijn gedaan door de agrariërs vanaf de winter van '22 – '23 komen goed overeen met de metingen bij de stuwen (Figuur 4-1). Met name de metingen van het drainwater lijken in termen van EGV sterk op dat van het afstromend water. De oppervlaktewatermetingen lijken iets sterker te variëren in zoutgehalte dan het water bij de stuwen. Mogelijke oorzaak hiervoor zou kunnen zijn dat de sloten in bepaalde gebieden relatief meer kwel aantrekken dan andere, maar ook de invloed van verschillen in waterpeil en een daardoor versterkt effect van verdamping zou bijvoorbeeld een rol kunnen spelen.

4.1.2 Operationele kwaliteit (verstoppingsrisico)

Het vroegtijdig optreden van putverstopping is een van de belangrijkste uitdagingen bij OWB. De mate waarin dit gebeurt is vooral afhankelijk van de samenstelling van het bronwater dat gebruikt wordt voor infiltratie. Aan de infiltratiekant kan putverstopping verschillende oorzaken hebben: fysisch door blokkades met in het bronwater aanwezige sedimentdeeltjes, chemisch door bijvoorbeeld neerslag van ijzermineralen, of biologisch door de aangroei van bacteriën. Daarnaast kan ook de insluiting van luchtbubbels (door foutief putontwerp) bij het infiltreren tot verstopping leiden. Als laatste kan infiltratie van zoet water in kleihoudende brakke aquifers tot kleizwelling- en mobilisatie leiden, waardoor ook putverstopping kan optreden.

Om het optreden van dergelijke putverstopping te minimaliseren wordt een aantal waterkwaliteitsrichtlijnen gehanteerd die zijn samengevat in Beernink & van der Schans (2023). Een overzicht van de gemeten waarden voor de parameters met een dergelijke richtlijn is te zien in Tabel 4-2. Hieruit blijkt dat zowel drain- als oppervlaktewater in bijna alle opzichten deze richtlijn niet haalt: de concentraties onopgeloste stoffen, ijzer, opgelost organisch materiaal (DOC) en ATP (een maat voor de microbiologische activiteit) zijn te hoog. De SAR waarde ('Sodium Adsorption Ratio') is alleen iets te hoog in het oppervlaktewater, niet in het drainwater.

Tabel 4-2. Gemiddelde concentratie van parameters relevant voor het operationele functioneren van het systeem. Voor bepaling van het gemiddelde is bij gerapporteerde waarden onder de detectiegrens de helft van de detectiegrens als waarde genomen. DOC = Dissolved Organic Carbon (opgeloste organische stof). SAR is Na/V(Ca + Mg) in meq/l. Richtlijn is <6 voor EGV van 0,4 tot 1 mS/cm en <3 voor EGV van 2 tot 5 mS/cm.

Parameter	Operationele richtlijn putverstopping (Beernink en van der Schans, 2023)	OW: de Kulke		OW: Batterijweg		Drainwater	
		Gemiddelde	#	Gemiddelde	#	Gemiddelde	#
Troebelheidsgraad (ntu)	1	7,6	4	12,9	4	2,3	4
TSS (mg/l)	0,1	10,3	5	8,7	5	1,3	4
IJzer, opgelost (µg/l)	10	89,2	5	52,6	5	10,5	4
DOC (mg/l)	2	10,0	5	8,5	5	6,7	4
ATP (pg/ml)	10	115,0	2	155,0	2	14,0	2
SAR (Sodium Adsorption Ratio)	<3 / <6	3,2	1	3,2	1	2,4	1

4.1.3 Milieuaspecten (vergunbaarheid)

Aan de kwaliteit van het te infiltreren water worden door de vergunningsverlener eisen gesteld. Bij een omvang van meer dan 150.000 m³/jaar valt dit in principe onder bevoegdheid van de provincie. Bij een kleinere omvang geldt een vergunningplicht of algemene regels op grond van de waterschapsverordening. In de basis wordt getoetst aan de parameterwaarden die volgen uit het zogeheten Infiltratiebesluit Bodembescherming. Een overzicht van de gemeten waarden voor parameters met een grenswaarde in dit Infiltratiebesluit is te zien in Tabel 4-3. Op een aantal aspecten voldoet zowel het oppervlaktewater als het drainwater niet aan de gestelde eisen voor infiltratie:

- In de oppervlaktewatermonsters is het zoutgehalte iets te hoog waardoor de concentraties chloride, sulfaat en natrium gemiddeld iets boven of op de norm lagen. Het drainwater voldeed in dit opzicht wel aan de norm.
- De gemiddelde nitraatconcentratie was alleen bij stuw de Batterijweg iets hoger was dan de gestelde grenswaarde (27,1 t.o.v. 24,8 mg NO₃/l).
- Qua sporenelementen was alleen de concentratie arseen bij stuw De Kulke gemiddeld genomen net iets hoger dan de norm (11,3 t.o.v. 10 µg/l).

Tabel 4-3. Gemiddelde concentratie van chemische parameters met een gestelde grenswaarde in het Infiltratiebesluit. Voor bepaling van het gemiddelde is bij gerapporteerde waarden onder de detectiegrens de helft van de detectiegrens als waarde genomen.

Parameter	Wetgeving (infiltratiebesluit)	OW: de Kulke		OW: Batterijweg		Drainwater	
		Gemiddelde	#	Gemiddelde	#	Gemiddelde	#
Ammonium (mg/l)	2,5	0,1	5	0,2	5	0,2	1
Chloride (mg/l)	200	250,0	5	286,0	5	177,5	4
Nitraat (mg/l)	5,6	20,2	5	27,1	5	19,8	4
Natrium (mg/l)	120	195,0	2	180,0	2	120,0	1
Sulfaat (mg/l)	150	151,4	5	136,0	5	60,8	4
Arseen (µg/l)	10	11,3	2	2,8	3	2,1	1
Cadmium (mg/l)	0,4	0,1	1	0,1	1	0,0	2
Koper (µg/l)	15	2,5	1	2,5	1	3,1	2
Lood (µg/l)	15	0,5	1	0,5	1	0,3	2

Ten aanzien van de waterkwaliteit geldt daarnaast op basis van de Kaderrichtlijn Water dat de inbreng van gevaarlijke en verontreinigende stoffen moet worden voorkomen en beperkt ('prevent & limit'). Dit principe is direct te vertalen naar de minimum kwaliteitseisen waaraan het infiltratiewater moet voldoen. Zo mogen de concentraties werkzame stoffen van gewasbeschermingsmiddelen en biociden niet hoger zijn dan 0,1 µg/l per stof en 0,5 µg/l totaal. Om te toetsen in hoeverre dit type stoffen in het oppervlakte- en drainwater aanwezig zijn de monsters genomen in februari 2024 ook geanalyseerd op een lijst van 98 stoffen die door de provincie wordt gehanteerd voor analyses binnen het grondwatermeetnet.

Voor een 9-tal stoffen leverde dit concentraties op boven de rapportagegrens (tussen de 0,01 en 0,05 µg/l) bij tenminste 1 monsterpunt (Tabel 4-4). Voor de concentraties Desphenyl-Chloridazon, Methyl-Desfenyl-Chloridazon en 2,6-Dichloorbenzamide (BAM) leverde dit concentraties op ruim boven de grens van 0,1 µg/l per stof waardoor ook de cumulatieve grens van 0,5 µg/l totaal bij alle vier de monsterlocaties werd overschreden, en dus in zowel oppervlakte- als drainwater. Alhoewel dit slechts 1 monsternoment betreft, is het niet de verwachting dat deze concentraties nog veel lager zullen uitpakken, gezien de monsters aan het eind van de zeer natte winter van '23 – '24 genomen zijn en de verdunning met afstromend regenwater dus relatief groot geweest moet zijn. Deze resultaten komen dan ook goed overeen met de bevindingen van het nog veel uitgebreidere onderzoek naar de aanwezigheid van gewasbeschermingsmiddelen in drain- en oppervlaktewater uitgevoerd door Hannewijk (2024).

Tabel 4-4. Gemeten concentratiewaarde van bestrijdingsmiddelen voor stoffen met tenminste 1 waarde boven de rapportagegrens. Monsters genomen op 28 februari 2024. Geanalyseerd door AL-West op een totaal van 98 stoffen. De norm voor een goede chemische toestand van een grondwaterlichaam in de Kader Richtlijn Water voor werkzame stoffen van gewasbeschermingsmiddelen en biociden is gesteld op 0,1 µg/l per stof en 0,5 µg/l totaal.

Stof	Type	Eenheid	Oppervlaktewater: Stuw Batterijweg	Oppervlaktewater: Stuw de Kulke	Drainwater locatie 1	Drainwater locatie 2
Glyfosaat	Herbicide	µg/l	0,04	0,08	<0,03	<0,03
Fluopicolide	Fungicide	µg/l	0,19	0,051	0,19	0,31
Fluopyram	Fungicide	µg/l	<0,030	0,033	<0,030	<0,030
AMPA	Metaboliët	µg/l	0,04	0,05	<0,03	<0,03
Bentazon	Herbicide	µg/l	<0,03	0,1	<0,03	<0,03
Methyl-Desfenyl-Chloridazon	Metaboliët	µg/l	1,3	1,5	1,7	1,6
2,6-Dichloorbenzamide (BAM)	Metaboliët	µg/l	0,98	0,48	1,3	2,3
Desphenyl-Chloridazon	Herbicide	µg/l	3,5	3,8	2,9	6
N,N-Dimethylsulfamide (DMS)	Metaboliët	µg/l	0,061	0,11	0,03	0,037
SOM			6,1	6,2	6,1	10,2

4.1.4 Benodigde voorzuivering

Op basis van de bovenstaande analyse zal de benodigde voorzuivering uit tenminste de volgende twee stappen moeten bestaan:

- (1) Een langzaam zandfilter, of een zeer fijn mechanisch filter, ter verwijdering van onopgeloste stoffen, nutriënten, ijzer, DOC en ATP. Bij gebruik van drainwater in plaats van het oppervlaktewater zou de benodigde zuiveringsinspanning in dit opzicht minder zijn.
- (2) Een actief koolfilter, ter verwijdering van de aanwezige bestrijdingsmiddelen. De benodigde zuiveringsinspanning lijkt in dit aspect niet significant af te hangen van of er oppervlaktewater of drainwater wordt gebruikt. Bij een recent gerealiseerd OWB-systeem op Texel zijn goede resultaten behaald met een actief koolfilter voor de verwijdering van bestrijdingsmiddelen (Merton et al., 2023). Het overschakelen op biologische landbouw in het gebied zou de concentraties van deze stoffen wel significant terug moeten dringen, en de zuiveringsinspanning dus significant kunnen verminderen. Maar ook in die situatie kan het voorkomen dat door nalevering van stoffen vanuit de bodem of verontreiniging vanuit de omgeving nog altijd niet aan de strenge eisen voor infiltratie kunnen worden voldaan en blijft voorzuivering nodig. Dergelijke nalevering is waargenomen door Hannewijk (2024) voor een biologische landbouwlocatie elders in de provincie Zeeland.

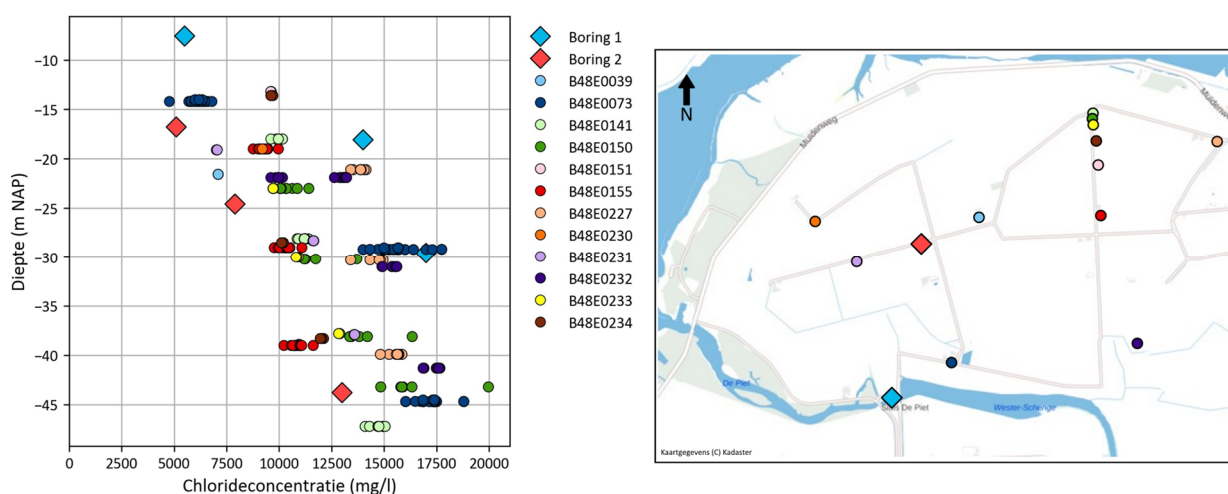
Het ten opzichte van het infiltratiebesluit soms te hoge zoutgehalte wordt door een dergelijke voorzuivering niet aangepakt. Dit is echter vermoedelijk ook niet nodig, gezien de chlorideconcentratie in het grondwater al 25 tot 75 keer zouter is dan het oppervlaktewater in de winters. De ten opzichte van de operationele richtlijn te hoge SAR van het oppervlaktewater wordt hierdoor ook niet aangepakt. De mogelijkheid van putverstopping door kleizwelling blijft dan ook een aandachtspunt waar rekening gehouden mee moet worden.

4.2 Grondwaterkwaliteit

4.2.1 Zoutgehalte

Uit monsternamen uit de peilbuisfilters bij de twee boringen blijkt dat het grondwater in de ondiepste filters, direct onder de deklaag, al erg zout is (Chlorideconcentratie > 5000 mg/l) en dat het zoutgehalte verder toeneemt met de diepte (Figuur 4-3). Het grondwater bij Boring 2, centraal in het studiegebied, blijkt uit de metingen een stuk minder zout dan bij Boring 1.

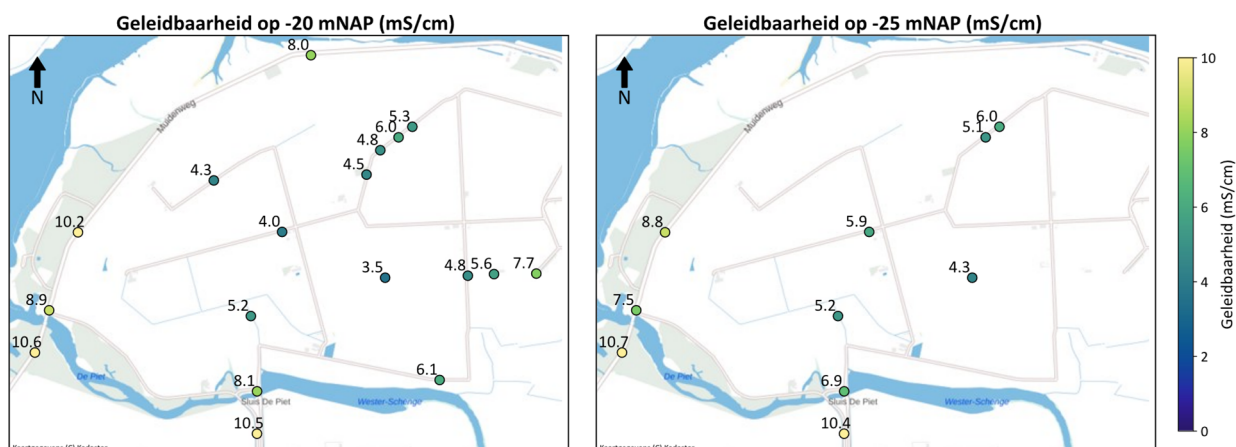
De chlorideconcentraties aangetroffen in de peilbuizen sluiten goed aan bij de beschikbare meetdata op DINOLoket (TNO, 2024) uit de periode 1983-2009 (Figuur 4-3). Ook hier lijken de zoutgehaltes meer centraal in de polders (bijv. B48E0039, B48E0155, B48E0231) wat lager dan de metingen meer naar de randen van het gebied (bijv. B48E0227, B48E0232, B48E0073). Overall in het gebied is het grondwater echter zout, met een lineaire toename met de diepte tot bijna zeewater (± 19.400 mg/l) onderin het eerste watervoerende pakket.



Figuur 4-3. Links: Chlorideconcentratie in het grondwater bij Wolphaartsdijk over de diepte voor monsters uit de peilbuisfilters geplaatst in dit project (ruiten) en verschillende meetpunten beschikbaar op DINOLoket (cirkels). Rechts: Locaties van de meetpunten.

Tijdens het uitvoeren van de CPT-sonderingen (Paragraaf 2.1.2) is ook de elektrische geleidbaarheid (EC of EGV) van de ondergrond gemeten. Deze geleidbaarheid is het resultaat van zowel het zoutgehalte van het grondwater als het sedimenttype op de diepte van de meting: fijnere sedimenten (klei en fijn) geleiden beter dan grovere sedimenten. Een inschatting van de geleidbaarheid van het water kan worden verkregen door de gemeten geleidbaarheid te vermenigvuldigen met de zogenoemde formatiefactor. Deze factor kent echter een grote mate van onzekerheid (De Louw, 2013). Omdat het sediment in het studiegebied vanaf 20 m-NAP voornamelijk bestaat uit zandlagen (zie Hoofdstuk 3), is het effect van variatie van de formatie op de geleidbaarheid voor verschillende sondeerlocaties vanaf deze diepte dus beperkt. De ruimtelijke spreiding van de gemeten geleidbaarheidswaarden geeft daarom een goede indicatie van de spreiding in zoutgehaltes.

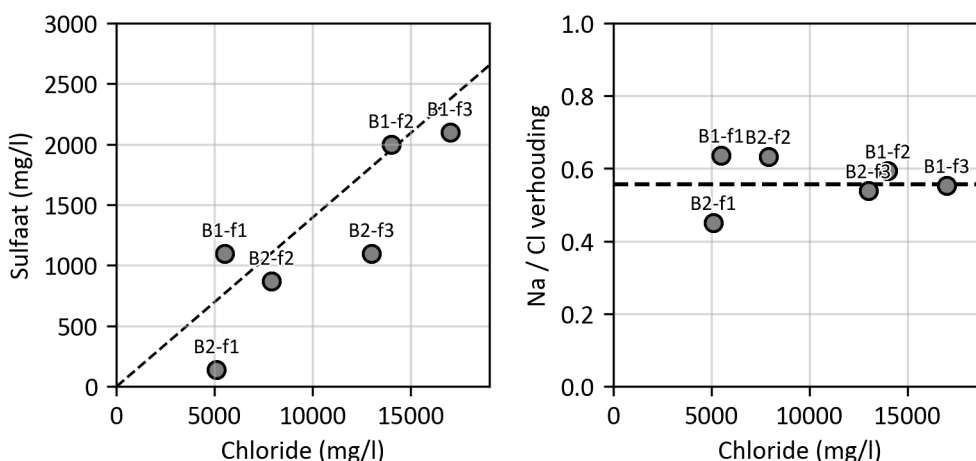
In Figuur 4-4 zijn de gemeten geleidbaarheidswaarden weergegeven op zowel -20 m NAP en -25 m NAP. De gemeten geleidbaarheid op deze dieptes is over het algemeen lager midden in de polders van het projectgebied dan aan de randen ervan. Dit duidt erop dat het grondwater in het midden van het gebied minder zout is. Dit sluit aan op de op het beeld verkregen uit de chlorideconcentraties in de bemonsterde peilbuizen (Figuur 4-3).



Figuur 4-4. Geleidbaarheid gemeten bij de CPT-sonderingen op -20 m NAP en -25 m NAP. De geleidbaarheid is hier afhankelijk van zowel de zoutgehalte van het grondwater als het type sediment.

4.2.2 Chemische samenstelling

De grondwatersamenstelling is geanalyseerd in alle drie de peilfilters van beide monitoringsputten (Tabel 2-1). De analyseresultaten tonen aan dat het grondwater zuurstof- en nitraatloos is op alle bemonsterde diepten. Het bevat echter wel sulfaat. De concentraties sulfaat komen over het algemeen overeen met de sulfaatconcentratie die mag worden verwacht op basis van conservatieve menging tussen zoet water en zeewater, waarbij voor sommige monsters geldt dat de sulfaatconcentratie hier enigszins onder ligt (Figuur 4-5 (links)). Dit duidt op het optreden van bacteriologische sulfaatreductie waarbij sulfaat wordt omgezet in sulfide (S^{2-}), wat vervolgens kan neerslaan als ijzersulfides zoals pyriet. In een dergelijk milieu kan de infiltratie van zuurstofrijk water weer leiden tot de oxidatieve oplossing van deze ijzersulfiden, wat gepaard kan gaan met de mobilisatie van sporenelementen zoals arseen (Stuyfzand et al., 2012). De aanwezigheid van sulfaat in de monsters duidt er wel op dat er hoogstwaarschijnlijk geen methaan in het grondwater aanwezig is (Schout, 2020). Dit is voordelig vanuit operationeel oogpunt omdat de reactie van zuurstof met methaan ongewenste biologische groei kan veroorzaken.



Figuur 4-5. Links: Concentratie chloride versus concentratie sulfaat, zwart gestreepte lijn is de verhouding tussen chloride en sulfaat in zeewater. Rechts: Concentratie chloride versus verhouding natrium en chloride, zwart gestreepte lijn geeft de verhouding tussen natrium en chloride in zeewater.

De verhouding tussen chloride en natrium en de mate waarin deze verhouding afwijkt van de Cl/Na verhouding in zeewater is een indicator voor het optreden van verzoeting dan wel verzilting. Bij indringing van zoet water worden geadsorbeerde Na ionen vervangen door Ca ionen, waardoor de Cl/Na verhouding afneemt, en vice versa bij verzilting. De gemeten Na/Cl in het grondwater (Figuur 4-5, rechts) ligt voor alle monsters echter dichtbij die van zeewater wat aangeeft dat variatie in zoutgehalten over de diepte redelijk constant is en dat er in de huidige situatie geen sprake lijkt van het optreden van sterke verzoeting of verzilting.

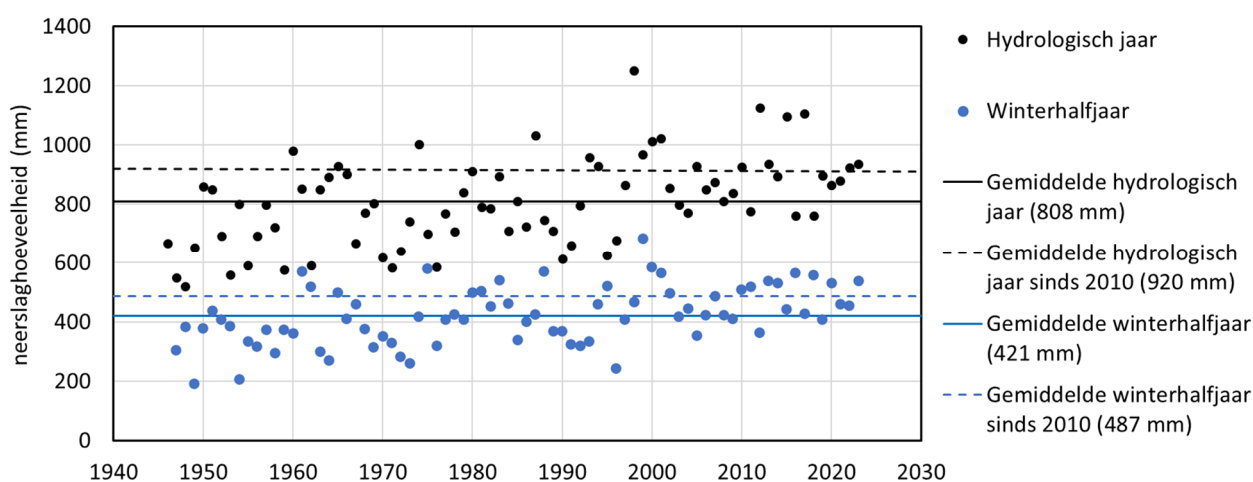
5 Waterkwantiteit

5.1 Waterbalans

5.1.1 Neerslag, verdamping en neerslagoverschot

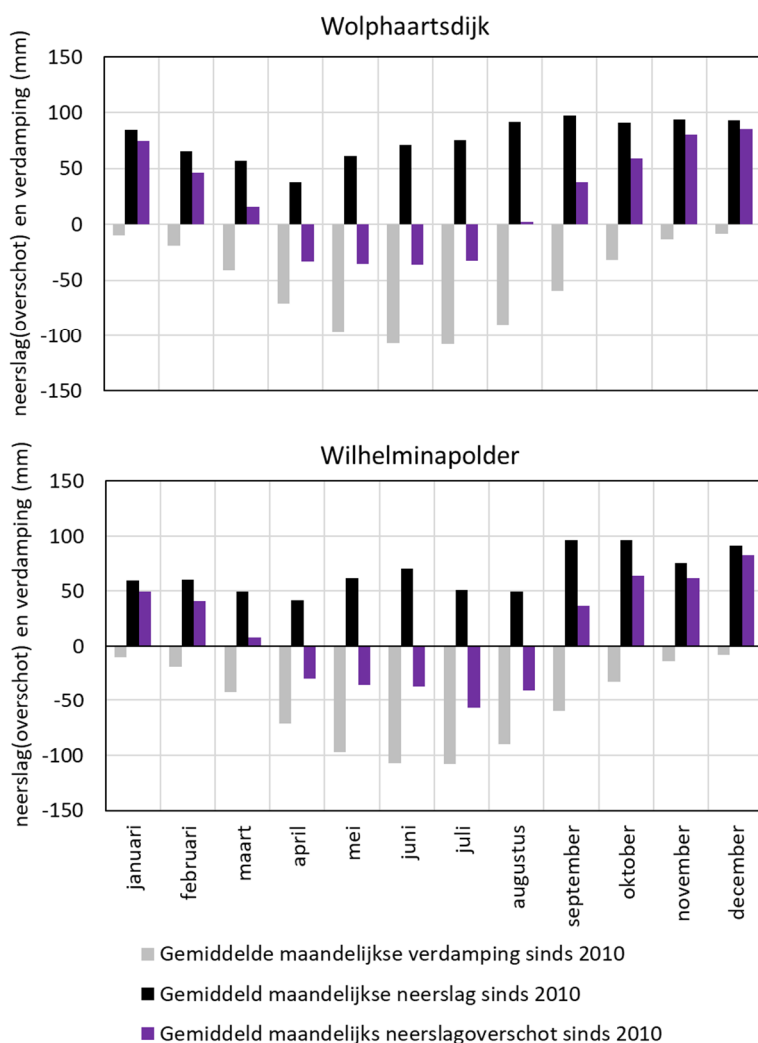
In Wolphaartsdijk is een neerslagstation van de KNMI waar al sinds 1947 de dagelijkse hoeveelheid neerslag gemeten wordt. De jaarlijkse totale hoeveelheid neerslag gedurende deze periode fluctueert tussen grofweg 600 en 1200 mm/jaar (Figuur 5-1), met een gemiddelde van 807 mm. Sinds 2010 ligt het gemiddelde een stuk een hoger, met 920 mm/jaar. Er lijkt dus een trend te zijn van toenemende hoeveelheid neerslag, overeenkomstig met de landelijke trend.

Voor ondergrondse waterberging is vooral de 's winters vallende neerslag interessant, omdat in tegenstelling tot zomerse neerslag deze anders vaak afgevoerd wordt en dus niet lokaal gebruikt wordt. De gemiddelde neerslag over de gehele meetperiode bij het weerstation Wolphaartsdijk was 421 mm voor de wintermaanden (oktober t/m maart). Ook de hoeveelheid 's winters vallende neerslag lijkt hoger te zijn geworden in de afgelopen decennia; over de laatste 10 jaar genomen was deze 485 mm.



Figuur 5-1. Jaarlijkse gemeten neerslag bij weerstation Wolphaartsdijk gedurende het hydrologisch jaar (April – Maart, zwart) en het winterhalfjaar (Oktober – Maart, paars) gedurende periode mei 1947 tot januari 2024. Bron: KNMI.

Om waterbeschikbaarheid in te kunnen schatten is naast de neerslag ook de verdamping belangrijk om te weten. Deze wordt door het KNMI berekend o.b.v. de gemeten straling en temperatuur. Bij het handmatige weerstation in Wolphaartsdijk wordt echter alleen neerslag gemeten. Voor de berekening van het neerslagoverschot is daarom gebruik gemaakt van het nabij gelegen automatische KNMI weerstation in Wilhelminadorp (10 km ten oosten van neerslagstation Wolphaartsdijk). Een vergelijking van beide weerstations toont aan dat ondanks de geringe afstand tussen beide stations de hoeveelheid neerslag bij Wolphaartsdijk, en daardoor ook het berekende neerslagoverschot, aanzienlijk hoger lijkt te zijn (Figuur 5-2). Mogelijk kan dit verschil (deels) worden verklaard door de structureel hogere neerslagwaarden die worden gevonden bij handmatige weerstations dan bij automatische weerstations in Nederland (Brandsma, 2014).



Figuur 5-2. Neerslag, verdamping en neerslagoverschot ingeschat op basis van KNMI neerslagdata bij Wolphaartsdijk (boven) en Wilhelminapolder (rechts). Verdampingsgegevens zijn alleen beschikbaar bij weerstation Wilhelminapolder; deze tijdreeks is dus voor beide locaties gebruikt.

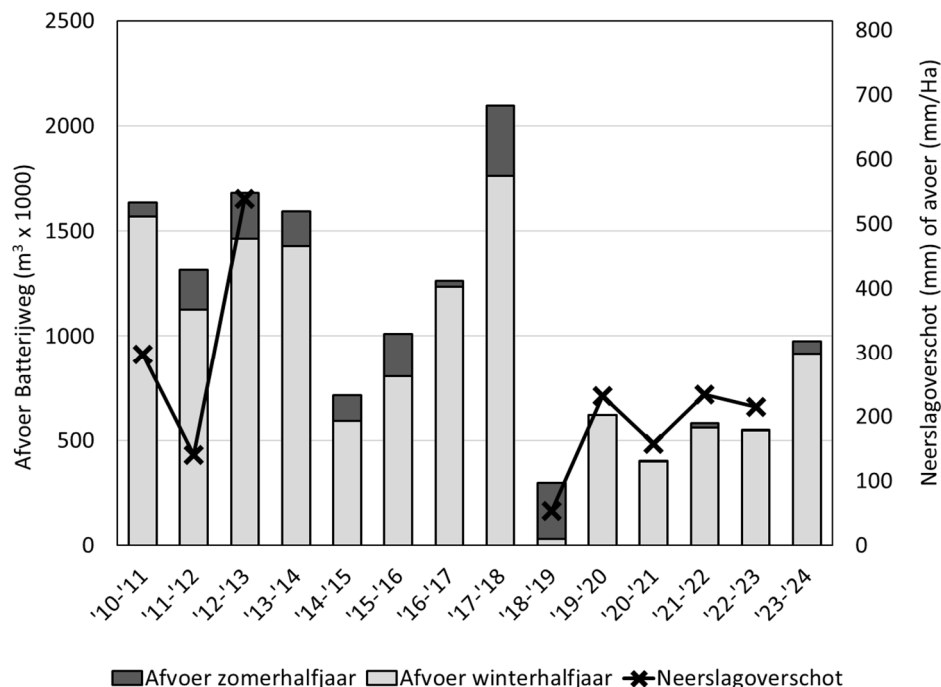
Gaan we uit van de neerslaggegevens van het meetstation in Wolphaartsdijk zelf, dan blijkt uit Figuur 5-2 dat er gemiddeld genomen in 6 maanden van het jaar netto ruim meer neerslag dan verdamping is (september t/m februari), in 4 maanden netto meer verdamping, en gedurende 2 maanden er evenwicht lijkt te zijn tussen neerslag en verdamping. In de periode sinds 2010 is het gemiddeld neerslagoverschot voor Wolphaartsdijk op jaarbasis 257 mm en gedurende het winterhalfjaar 364 mm (Tabel 5-1). Een schatting o.b.v. de neerslag bij weerstation Wilhelminapolder geeft een aanzienlijk lager neerslagoverschot: 148 mm op jaarbasis en 314 mm in het winterhalfjaar.

Tabel 5-1. Gemiddelde hoeveelheid neerslag en verdamping en het neerslagoverschot in het winterhalfjaar, sinds 2010, voor de KNMI weerstations Wolphaartsdijk en Wilhelminapolder.

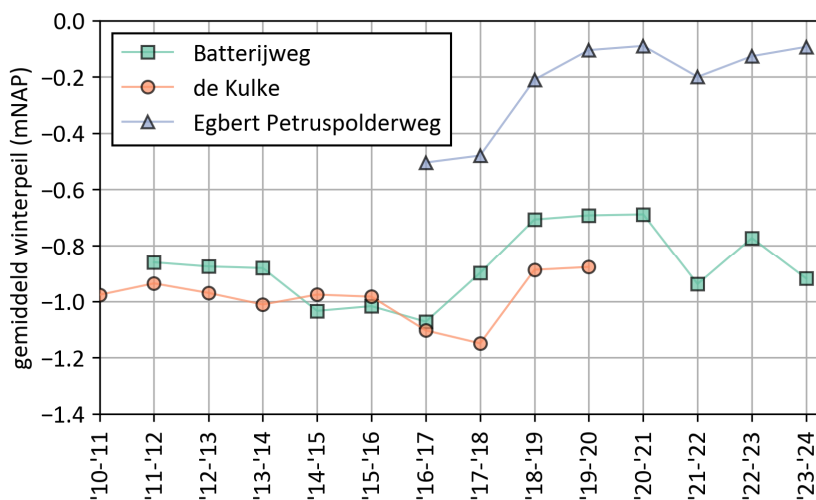
	Wolphaartsdijk (sinds 2010)		Wilhelminapolder (sinds 2010)	
	Hydrologisch jaar	Winterhalfjaar	Hydrologisch jaar	Winterhalfjaar
Neerslag (mm)	914	488,4	805	438
Verdamping (mm)	657*	124*	657	124
Neerslagoverschot (mm)	257	364	148	314

5.1.2 Afvoerdebit

Bij Stuw Batterijweg wordt door het waterschap Scheldestromen sinds juli 2009 het debiet van het afstromende water gemonitord. Te zien is dat er vrij grote variatie is in de mate van afvoer per winterseizoen, en dat de afvoer vanaf de winter van 2018-2019 aanzienlijk lager lijkt te zijn geworden (Figuur 5-3). Dit blijkt ook uit het verschil tussen de gemiddeld gemeten afvoer gedurende het winterhalfjaar over de gehele meetreeks (933.909 m³) en het gemiddelde over de laatste 5 hydrologische jaren waarvan de totale meetreeks beschikbaar is (431.528 m³ van '18-'19 tot '22-'23). De verklaring hiervoor lijkt te zijn dat sinds het hydrologisch jaar '18-'19 de peilen in het gebied zijn verhoogd (Figuur 5-4), en er dus meer water is vastgehouden en minder is afgevoerd.



Figuur 5-3. Ontwikkeling in de cumulatieve afvoer over de stuw Batterijweg per hydrologisch jaar, opgesplitst in het deel dat afstroomt in het zomerhalfjaar (april – september) en het daarop volgende winterhalfjaar (oktober – maart). Op de rechter y-as is de afvoer ook af te lezen in termen van mm/ha, om een vergelijking te kunnen maken met het berekende neerslagoverschot per hydrologisch jaar (april – maart). Bij de omrekening is uitgegaan van een areaal van 306,8 ha dat door de stuw wordt afgewaterd. Afvoergegevens afkomstig van Waterschap Scheldestromen, neerslagoverschot o.b.v. KNMI gegevens van weerstation Wolphaartsdijk (neerslag) en Wilhelminapolder (verdamping).



Figuur 5-4. Gemiddeld winterpeil (oktober – maart) aan instroomkant bij de stuw Batterijweg, de Kulke en Egbert Petruspolderweg. Gegevens afkomstig van Waterschap Scheldestromen.

Een voorzichtige waterbalans kan opgemaakt worden voor het deel van het projectgebied wat wordt afgewaterd door stuw Batterijweg. Daarbij valt op dat voor de laatste 5 jaar het volume afstromend water zeer goed overeenkomt met het neerslagoverschot (Figuur 5-3), waarbij het neerslagoverschot in 4 van de 5 jaar iets groter was dan het afstromend volume (10 tot 20%). In de jaren '10-'11 en '11-'12 was er juist sprake van veel grotere afvoer dan netto neerslag. Mogelijk wordt dit deels veroorzaakt door een aanzienlijke kwelflux die ook is afgevoerd over de stuwen, mogelijk versterkt door de lagere peilen die destijds in de polder werden gehanteerd, met als gevolg een hogere kweldruk. Anderzijds zou het lagere waterpeil ook kunnen leiden tot verminderde verdamping, door snellere afvoer van het oppervlaktewater en verminderde plasvorming op het land. Het zoutgehalte van het bij de stuwen afgevoerde water werd destijds nog niet gemeten, en de hypothese over de kwelflux kan dus niet op basis daarvan getoetst worden.

De winter van 2018-2019 toont aan dat de afvoer in extreme gevallen zelfs gedurende het winterhalfjaar bijna nul kan zijn. Voor de toepassing van OWB betekent deze variatie dat het voor kan komen dat er winters zijn waarbij weinig tot niks geïnfiltreerd kan worden, ondanks dat de algemene verwachting is dat de hoeveelheid winterse neerslag door klimaatverandering eerder zal toenemen. Noemenswaardig is verder dat als voor de inschatting van het gemiddeld afstromend volume gedurende de laatste 5 jaar de winter van 2018-2019 niet wordt meegerekend, de schatting van het gemiddeld afstromend debiet veel hoger uitpakt (531.554 m^3 in plaats van 431.528 m^3). Het hierbij betrekken van het (ten tijde van het schrijven van dit rapport) nog lopende en zeer natte hydrologische jaar van '23 – '24 zou deze schatting nog veel verder omhoog bijstellen (608.105 m^3). Het getal van 431.528 m^3 is dus waarschijnlijk een conservatieve aanname voor de verkenning van de haalbaarheid van OWB.

Om de afvoer van het hele gebied te bepalen zou bovenstaande analyse ook nodig zijn voor de debieten bij stuw de Kulke. Hier worden echter geen debietmetingen verricht. Aannemend dat bij stuw de Kulke per m^2 van het afvoergebied evenveel water wordt afgevoerd als bij stuw Batterijweg zou de geschatte afvoer hier net iets groter zijn (454.736 m^3).

5.2 Maximaal infiltratievolume

5.2.1 EGV afstromend water bij stuwen

Water dat niet voldoet aan een gegeven waterkwaliteitscriterium kan niet worden geïnfiltreerd. In de eerste plaats wordt hierbij doorgaans gekeken naar het zoutgehalte, en is het dus de vraag of het 's winters afstromend water zoet genoeg is voor gebruik als irrigatiewater. Er is echter geen eenduidig zoutgehalte wat door iedere agrariër nog acceptabel wordt geacht voor beregening, en dit kan bovendien ook afhangen van omstandigheden. Om toch een inschatting te maken van het deel 's winters afstromend water dat van voldoende kwaliteit is voor infiltratie (in termen van zoutgehalte) is hierbij gekeken naar de toepassing van mogelijke grenswaarden van 1,5 en 2 mS/cm. Alhoewel de correlatie tussen EGV en chloride bij lage zoutgehalte niet eenduidig is (Figuur 4-2), komt een EGV van 2 mS/cm over het algemeen overeen met een chloride concentratie van rond de 250 mg/l (op basis van de relatie in De Louw et al., 2013).

Uit deze analyse blijkt dat wanneer 2 mS/cm als grenswaarde genomen zou worden, nagenoeg 100% van het afstromend water geïnfiltreerd kan worden (Tabel 5-2). Daarentegen zou een aanzienlijk kleiner deel geïnfiltreerd kunnen worden wanneer 1,5 mS/cm als grenswaarde genomen zou worden, variërend tussen de 26,5% en 40,6% over de driejaarlijkse periode met de benodigde databeschikbaarheid. De beschikbare hoeveelheid water voor infiltratie is dus heel gevoelig voor de gehanteerde grenswaarde.

Tabel 5-2. Analyse van het deel bij de stuw Batterijweg afstromend water beneden grenswaarde in geleidbaarheid van 1,5 en 2 mS/cm.

Periode	Totale afvoer winterhalfjaar (m ³)	Afvoer < 2 mS/cm (m ³)	Deel afvoer < 2 mS/cm	Afvoer < 1,5 mS/cm (m ³)	Deel afvoer < 1,5 mS/cm
'20 - '21	315.830	315.164	99,8%	96.655	30,6%
'21 - '22	527.184	525.065	99,6%	214.239	40,6%
'22 - '23	548.053	539.778	98,5%	145.495	26,5%

5.2.2 Infiltratiedebiet per put

Voor de toepassing van OWB is het debiet waarmee per put geïnfiltreerd kan worden van groot belang, aangezien het aantal benodigde putten de investeringskosten voor een belangrijk deel bepalen. In dit geval wordt het maximale debiet per put niet bepaald door de maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand, zoals bij onttrekkingsputten gebruikelijk is (zie bijv. van der Schans & Meerkerk, 2019), maar door de maximaal toelaatbare druk om het risico op opbarsting van de deklaag te voorkomen. Doorgaans wordt voor de inschatting van dit risico het criterium in Olsthoorn (1982) gehanteerd, wat stelt dat de druk op de putten niet hoger mag oplopen dan 0,2 x dikte van de deklaag. Deze drukopbouw kan weer berekend worden op basis van de analytische Thiem formule (Thiem, 1870), en is naast het injectiedebiet ook afhankelijk van de doorlatendheid en dikte van de opslaglaag, en de weerstand van onder- en bovenliggende kleilagen.

Voor vier verschillende uitgangssituaties is deze Thiem formule gebruikt om het maximale debiet te berekenen waarmee kan worden geïnfiltreerd op basis van de maximale infiltratiedruk volgend uit het criterium van Olsthoorn (1982). Hierbij is uitgegaan van een verticale put met één filter over de gehele diepte van het opslagpakket. In termen van geohydrologische parameters zijn de uitgangssituaties zo gekozen dat ze binnen de bandbreedte van de mogelijkheden vallen op basis van de analyse in Hoofdstuk 3 en daarmee combinaties vormen die corresponderen met een range aan infiltratiedebieten variërend van conservatief tot optimistisch. Uiteindelijk levert dit dus een bandbreedte aan mogelijke debieten op (Tabel 5-3).

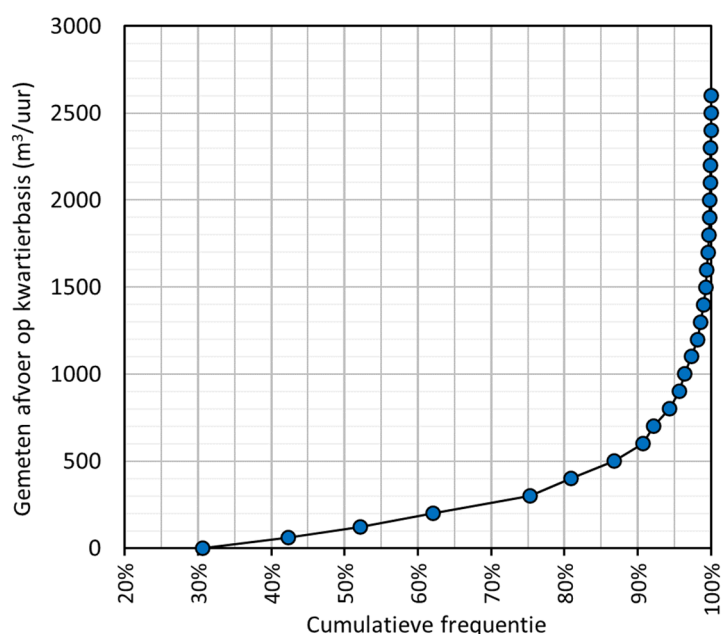
Tabel 5-3. Geschatte infiltratiedebiet per put voor enkele verschillende van de aangetroffen geohydrologische situaties in het projectgebied. Van links naar rechts gerangschikt van een combinatie van aannames leidend tot een conservatief (laag) naar optimistisch (hoog) ingeschat infiltratiedebiet.

	Conservatief <<< ----->>>	Optimistisch
Bovenkant injectietraject (m-mv)	21	16
Onderkant injectietraject (m-mv)	35	35
Dikte injectietraject (m)	14	19
Aangrijppunt voor opbarsten (m-mv)	12	12
Doorlatendheid (m/dag)	15	15
Max. theoretisch debiet (m ³ /uur)	16	21
Max. theoretisch debiet (m ³ /dag)	376	501
Max. debiet bij 70% capaciteit (m ³ /uur)	11	15
Max. debiet bij 70% capaciteit (m ³ /dag)	263	351

Op basis van deze berekeningen kan dus in principe uitgegaan worden van een debiet tussen de 16 en 26 m³/uur (Tabel 5-3). Voor grondwaterputten geldt echter dat er altijd rekening gehouden moet worden met enige mate van putverstopping (van der Schans & Meerkerk, 2019) – in feite de vorming van een weerstandslaag op het boorgat waardoor de druk in de put nog iets sterker oploopt dan puur op basis van de geohydrologie mag worden verwacht. Gaan we ervan uit dat er regeneratie van de putten zal plaatsvinden wanneer de capaciteit is afgenomen tot 70% van het theoretisch maximale debiet, dan zullen de daadwerkelijke infiltratiedebieten op dat moment dus variëren tussen de 11 en 18 m³/uur. Concluderend lijkt een debiet rond de 15 m³/uur per put een passende aanname, afhankelijk van de precieze locatie, de snelheid waarmee verstopping optreedt, en de putregeneratiefrequentie.

5.2.3 Afvangen piekafvoer en benodigde buffercapaciteit

Statistische analyse van de geregistreerde debieten bij stuw de Batterijweg in het winterhalfjaar toont aan dat ongeveer 50% van de gemeten debieten lager zijn dan 100 m³/uur (Figuur 5-5), ofwel 2400 m³/dag. De analyse in Paragraaf 5.2.1 toont aan dat voor een injectiedebiet van 100 m³/uur mogelijk 6 tot 7 grondwaterputten nodig zullen zijn. Dat betekent echter niet dat met een dergelijke injectiecapaciteit ook 50% van het wegstromend volume afgevangen, gezuiverd en geïnfiltreerd zal kunnen worden: als er een hoger debiet afstroomt dan de maximale injectiecapaciteit, stroomt een deel van het water af. Zeker op dagen met een zeer hoge afvoer, soms tot meer dan 2000 m³/uur (Figuur 5-5), kan slechts een fractie van de afvoer direct worden geïnfiltreerd. Andersom gaat de injectiecapaciteit van de putten onderbenut in periodes een lagere afstroom. Het creëren van bovengrondse buffercapaciteit tussen het oppervlaktewater en de ondergrondse waterberging zou daarom bij kunnen dragen aan betere benutting van het langstromende oppervlaktewater.

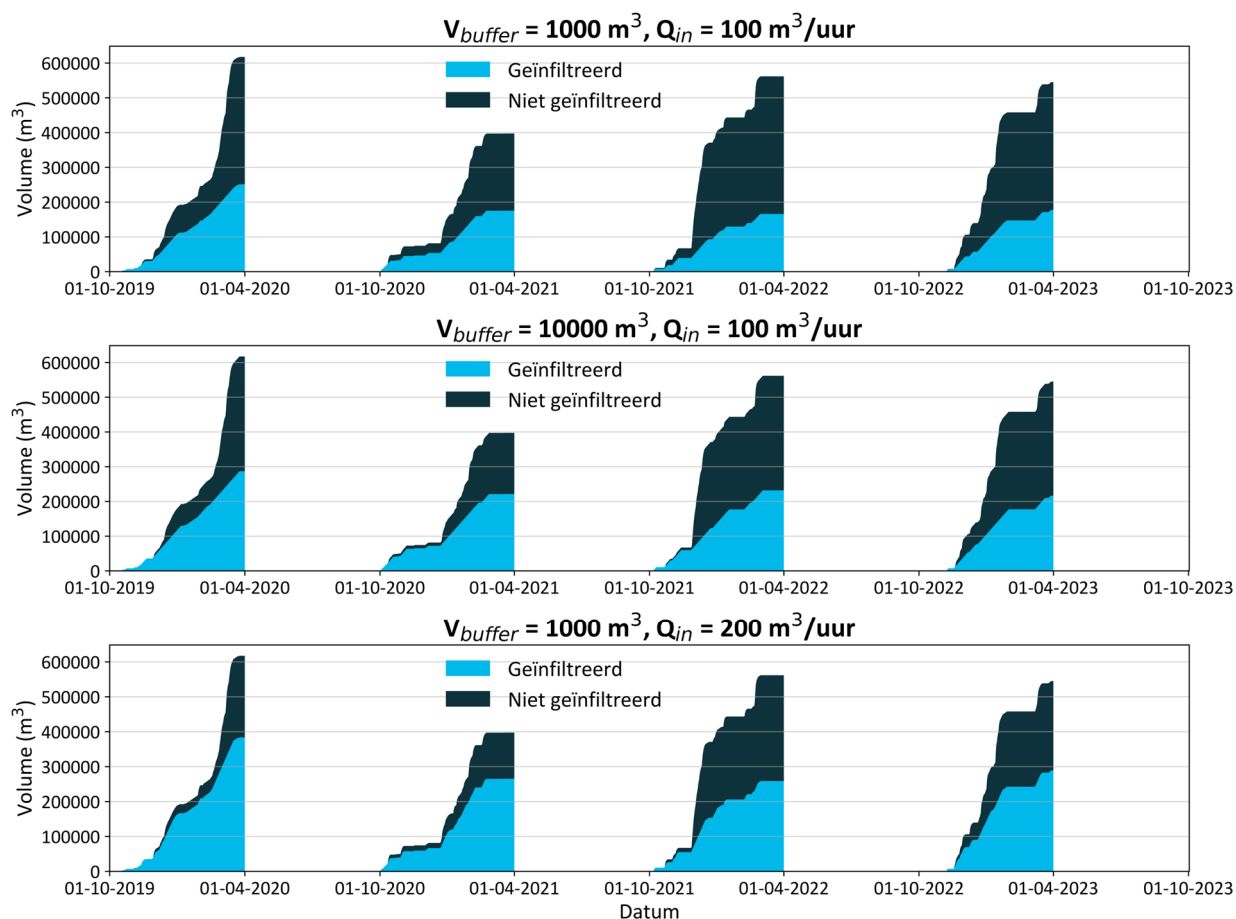


Figuur 5-5. Cumulatieve frequentieverdeling van de geregistreerde debieten (op kwartierbasis) bij Stuw Batterijweg, in het winterhalfjaar.

Om de benodigde bovengrondse buffercapaciteit in te schatten is een waterbalansmodel opgezet voor de periode oktober 2019-september 2023. Hierbij is gebruik gemaakt van het door KWR voor de glastuinbouw ontwikkelde SWALLOW-model (Stofberg et al., 2021). In dit model is op basis van de afvoergegevens bij Stuw Batterijweg op uurbasis doorgerekend hoeveel van de afvoer geïnfiltreerd kan worden. Alleen de afvoer in het winterhalfjaar (1 oktober tot 1 april) is meegenomen in de berekeningen. Het model is doorgerekend voor infiltratiecapaciteiten van 100 en 200 m³/uur en buffervolumes variërend van 100 tot 100.000 m³.

In geen van de gemodelleerde varianten (Tabel 5-4) kon de volledige afvoer bij de stuw worden geïnfiltreerd. Alleen in een relatief korte periode aan het begin van het winterseizoen kon het gehele afvoerdebiet geïnfiltreerd of gebufferd kan worden (Figuur 5-6). Zo is het afvoerdebiet bij Stuw Batterijweg (Figuur 5-5) gedurende een lange periode, ca. 40-50% van de tijd, hoger dan de hier doorgerekende infiltratiecapaciteiten, waardoor de bovengrondse buffervolumes relatief snel volraken en dus een aanzienlijk deel van het water niet geïnfiltreerd kan worden (Tabel 5-4 & Figuur 5-7). Dit was zelfs het geval bij een hoog bovengronds buffervolume van 100.000 m³, dat in de praktijk niet snel aangelegd zal worden. Bij kleinere, meer realistische, bovengrondse buffervolumes zorgde extra buffercapaciteit er wel voor dat in ieder jaar meer water kon worden geïnfiltreerd, afhankelijk van het jaar en de modelvariant 40.000 tot 75.000 m³ per jaar wanneer het buffervolume toenam van 100 m³ naar 10.000 m³.

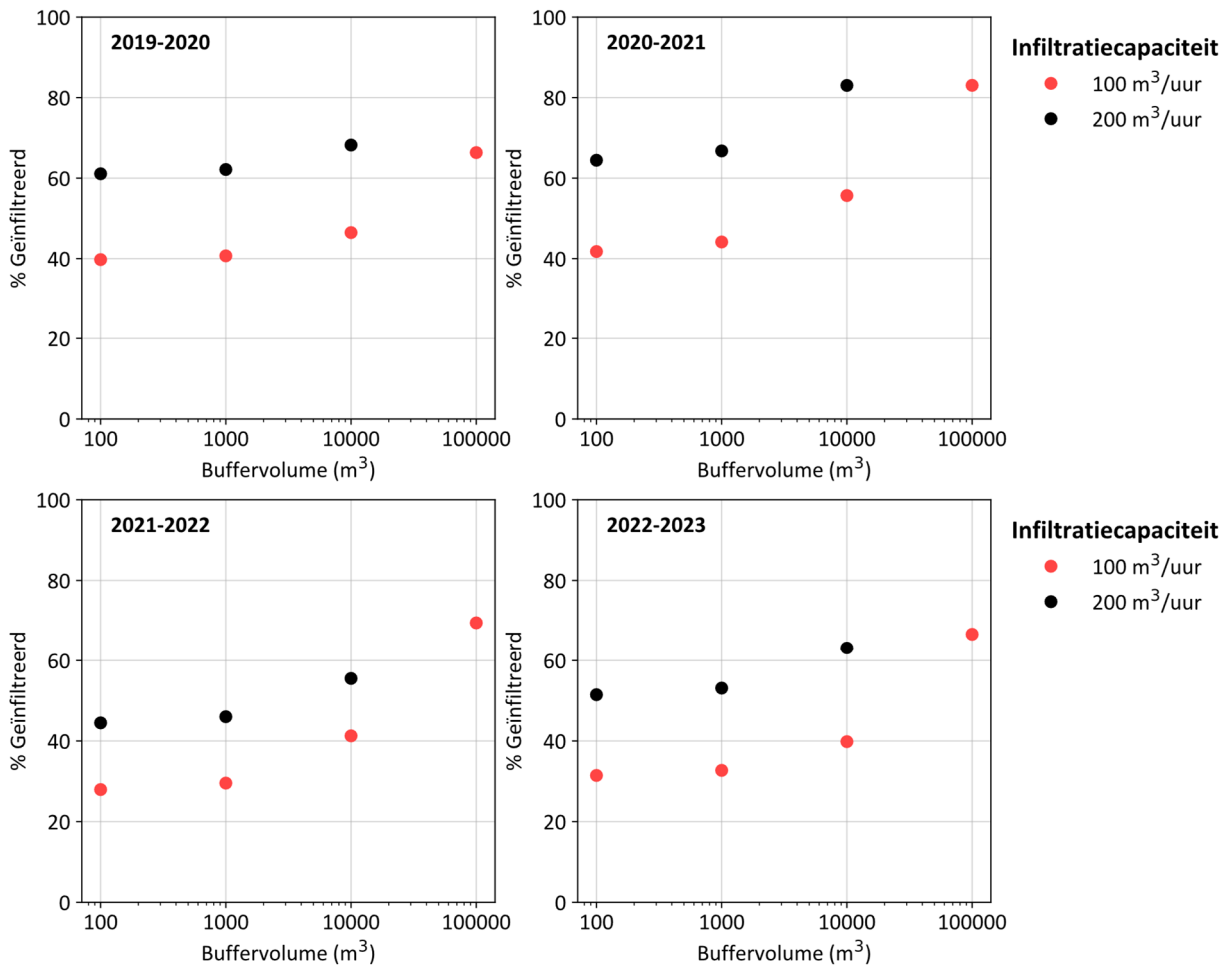
Een verdubbeling van de infiltratiecapaciteit, van 100 m³/uur naar 200 m³/uur, zorgt voor een sterkere toename van de hoeveelheid water die kon worden geïnfiltreerd in de modelvarianten: een toename van 80.000 tot 130.000 m³/jaar of ca. 15-20% (Tabel 5-4). Dit verschil is duidelijk waarneembaar in Figuur 5-7: een verdubbeling van de infiltratiecapaciteit heeft meer effect dan een vergroting van het buffervolume van 100 m³ naar 10.000 m³. Bij een infiltratiecapaciteit van 100 m³/uur is gemiddeld ca. 40% van het debiet bij de stuw infiltreerbaar, bij een infiltratiecapaciteit van 200 m³/uur is dit gemiddeld ca. 60%.



Figuur 5-6. Cumulatief geïnfiltreerd en niet geïnfiltreerd volume oppervlaktewater bij stuw Batterijweg tijdens het winterhalfjaar (1 oktober tot 1 april) in de periode 2019-2023 volgend uit de SWALLOW berekeningen voor een drietal combinaties van buffervolume en infiltratiecapaciteit.

Tabel 5-4. Geïnfiltreerde hoeveelheden water als absoluut volume en percentage van de totale afvoer in het winter halfjaar (1 oktober tot 1 april) op basis van de SWALLOW-berekeningen.

Bovengronds buffervolume	Infiltratie-capaciteit	Infiltratie (volume en % van afvoer in winterhalfjaar)							
		2019-2020		2020-2021		2021-2022		2022-2023	
		m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	%
m ³	m ³ /uur								
100	100	245.510	40%	166.004	42%	157.006	28%	171.732	31%
1.000	100	251.273	41%	175.435	44%	166.023	30%	178.583	33%
10.000	100	286.945	46%	221.249	56%	231.845	41%	217.518	40%
100.000	100	409.689	66%	330.069	83%	390.364	69%	363.826	67%
100	200	377.208	61%	256.119	64%	249.937	44%	281.068	51%
1.000	200	383.762	62%	265.330	67%	258.527	46%	290.022	53%
10.000	200	421.274	68%	329.992	83%	311.858	56%	344.959	63%



Figuur 5-7: Geïnfiltreerde hoeveelheden zoet water als percentage van de totale afvoer in het winter halfjaar (1 oktober tot 1 april) op basis van de SWALLOW-berekeningen in 4 verschillende jaren uitgezet tegenover het bovengrondse buffervolume voor een infiltratiecapaciteit van de ondergrondse waterberging van 100 en 200 m³/uur. N.B. de x-as heeft een logaritmische schaal.

5.2.4 Benutting putcapaciteit

Uit de bovenstaande analyse blijkt dat een infiltratiecapaciteit van 100 of 200 m³/uur onvoldoende is om de volledige afvoer bij Stuw Batterijweg te kunnen infiltreren. Dit betekent echter niet dat de putten gedurende het volledige winterhalfjaar op volledige capaciteit aan het infiltreren zijn in deze varianten: in droge periodes zonder afvoer zullen de putten, wanneer het buffervolume is weggewerkt, uit worden geschakeld. Deze periodes zijn in Figuur 5-6 zichtbaar als periodes waarin tijdens het winterhalfjaar het geïnfiltreerde volume constant bleef.

Op basis van de SWALLOW-berekeningen is een inschatting gemaakt van de vollasttijd van de putten voor de hier doorgerekende varianten en het percentage benutting van de putten in het winterhalfjaar. Deze inschatting is weergegeven in Tabel 5-5. Bij een groter buffervolume kan in droge periodes langer worden geïnfiltreerd, waardoor de vollasttijd toeneemt met toenemend buffervolume. Bij een hogere infiltratiecapaciteit wordt het buffervolume juist sneller leeg getrokken, en hoeft er minder vaak op volledige capaciteit geïnfiltreerd te worden, waardoor de vollasttijd juist lager is. Bij een infiltratiecapaciteit van 100 m³/uur is de vollasttijd gemiddeld 86 dagen (gemiddeld over alle jaren en buffervolume 100 – 10.000 m³) en de benutting van de putten dus 47%, voor 200 m³/uur is dit 66 dagen of 36%.

Tabel 5-5. Vollasttijd van de infiltratieputten op basis van de SWALLOW berekeningen.

Bovengronds buffervolume	Infiltratie- capaciteit	Vollasttijd infiltratieputten (uren, dagen en % benutting van het winterhalfjaar)											
		2019-2020			2020-2021			2021-2022			2022-2023		
		Uren	Dagen	%	Uren	Dagen	%	Uren	Dagen	%	Uren	Dagen	%
m ³	m ³ /uur												
100	100	2455	102	56%	1660	69	38%	1570	65	36%	1717	72	39%
1000	100	2513	105	57%	1754	73	40%	1660	69	38%	1786	74	41%
10000	100	2869	120	65%	2212	92	51%	2318	97	53%	2175	91	50%
100000	100	4097	171	93%	3301	138	76%	3904	163	89%	3638	152	83%
100	200	1886	79	43%	1281	53	29%	1250	52	29%	1405	59	32%
1000	200	1919	80	44%	1327	55	30%	1293	54	30%	1450	60	33%
10000	200	2106	88	48%	1650	69	38%	1559	65	36%	1725	72	39%

5.3 Watervraag en beschikbaarheid voor een voorbeeldagrariër

Om de in dit hoofdstuk uitgevoerde waterbalansberekeningen en mogelijke opslagvolumes uiteindelijk te kunnen vertalen tot verschillende varianten voor de modelberekeningen (Hoofdstuk 6) is een inschatting gemaakt van de waterbeschikbaarheid en watervraag voor een enkele, relatief kleine, agrariër op Wolphaartsdijk. Een overzicht van de uitgangspunten en daaruit volgende cijfers is gegeven in Tabel 5-6.

Als input voor deze berekening is uitvraag gedaan naar watergebruik bij een agrariër in het gebied die al werkt met wateropslag in een oppervlaktewaterbassin, en dus ook ervaring heeft met berekening. Hieruit kwam naar voren dat een 'gemiddelde' agrariër in het projectgebied ieder jaar ca. 40% van zijn land gebruikt voor het verbouwen van gewassen die berekening behoeven; ca. 15% uien en ca. 25% voor aardappelen. De uien moeten ongeveer 4 keer per jaar beregend kunnen worden en de aardappelen 2 keer per jaar, waarbij bij iedere berekening bestaat uit ca. 20 mm water. Dit komt neer op 80 mm/jaar berekening voor uien en 40 mm/jaar voor aardappel. Ordegrootte komen deze getallen overeen met de verzamelde gegevens door Stokkers et al. (2022), waar voor de periode 2010-2019 een gemiddeld waterverbruik op kleigronden werd gevonden van 48 mm/jaar voor ui en respectievelijk 31 mm/jaar en 49 mm/jaar voor poot- en consumptieaardappelen.

Als voorbeeld wordt hier uitgegaan van een agrariër met een voor het gebied relatief klein areaal van 40 ha. Met deze 40 ha zou dit betekenen dat voor deze agrariër 4.800 m³ per jaar zoet water nodig is voor het beregenen van uien en 4.000 m³ per jaar voor zijn aardappelen. De totale zoetwatervraag voor deze agrariër is dus 8.800 m³ per jaar.

Voor wat betreft de waterbeschikbaarheid blijkt uit de analyse in Paragraaf 5.2.1 dat nagenoeg al het afstromend water zoet genoeg is voor berekening en er bij de Batterijweg (ontwaterend gebied van 306,8 ha) jaarlijks gemiddeld 431.528 m³ afstroomt. Wanneer dit volume water evenredig verdeeld zou moeten worden over de agrariërs in het gebied, naar rato van hun landareaal, zou er 1.407 m³/ha beschikbaar zijn. Bij een areaal van 40 ha is dit gelijk aan 56.262 m³ per jaar beschikbaar voor infiltratie. Wanneer er genoeg buffer- en/of infiltratiecapaciteit is om dit volledig te kunnen infiltreren zou de benodigde terugwinefficiëntie ca. 16% moeten zijn om aan de watervraag van 8.800 m³ te voldoen. Wanneer slechts de helft geïnfiltreerd kan worden, is de benodigde terugwinefficiëntie het dubbele, ca. 31%.

Een evenredige verdeling van het wegstromende oppervlaktewater zal met name van belang zijn wanneer er aanspraak gemaakt wordt op een significant deel van de totale waterbeschikbaarheid in het stroomgebied. Als slechts een enkele agrariër met een bescheiden areaal, zoals in het voorbeeld met 40 ha, van het wegstromende zoete water gebruik zal maken zou deze veel meer dan de genoemde 1.407 m³/ha kunnen innemen, omdat er op de rest van het afgevoerde water (nog) geen aanspraak gemaakt wordt.

Tabel 5-6. Uitgangspunten en daaruit volgende cijfers voor de watervraag en waterbeschikbaarheid voor een enkele voorbeeldagrariër in Wolphaartsdijk.

Uitgangspunten watervraag	
Areaal uien (%)	15
Areaal aardappelen (%)	25
Watervraag uien (aantal keer x mm per keer)	4 x 20
Watervraag aardappelen (aantal keer x mm per keer)	2 x 20
Uitgangspunten waterbeschikbaarheid	
Stuw	Batterijweg
Afvoergebied	Westkerke- en Egbert Petruspolder
Periode	2018-2023
Gemiddelde afvoer november – maart (m ³ per jaar)	431.528
Totaal areaal (Ha)	306,8
Beschikbare afvoer (m ³ ha ⁻¹)	1.407
Voorbeeldberekening voor één agrariër	
Areaal (Ha)	40
Areaal uien (Ha)	6
Areaal aardappelen (Ha)	10
Watervraag totaal (m ³)	8.800
Water beschikbaar bij evenredig verdelen (m ³)	56.280
Rendement benodigd bij 100% afvang en infiltratie	16%
Rendement benodigd bij 50% afvang en infiltratie	31%

6 Grondwatermodellering

Uit de waterbalansberekeningen blijkt dat in het winterhalfjaar een grote hoeveelheid zoet water, deels infiltreerbaar water, het gebied uitstroomt (Paragraaf 5.1.2). De infiltratie van dit zoete water kan in meer of mindere mate zorgen voor beschikbaar zoet water in de zomer, afhankelijk van hoeveel ervan na infiltratie teruggewonnen kan worden. Om deze reden is aan de hand van een modelstudie onderzocht in welke mate ondergrondse waterberging, met seizoensopslag van zoet water, bij kan dragen aan het dekken van de watervraag in de zomer in het gebied en waar dit van afhankelijk is.

Door het hoge zoutgehalte van het in het eerste watervoerende pakket aanwezige grondwater is de verwachting dat het lichtere geïnfiltreerde zoete water sterk zal opdrijven naar de bovenkant van dit pakket. Om zoveel mogelijk van dit opgeslagen zoete water te kunnen benutten ligt het daarom voor de hand zo veel mogelijk van het zoete water uit de bovenkant van het pakket te onttrekken. De focus van de modelstudie lag daarom op twee methoden waarbij dit het geval is. Ten eerste is gekeken naar het gebruik van verticale putten met meerdere onder elkaar geplaatste filters ('Multiple Partially Penetrating Wells' of MPPW), waarbij alle filters gebruikt worden voor infiltratie, en enkel de bovenste (paar) voor onttrekking. Door toepassing van deze techniek kan relatief meer van het zoete water worden onttrokken dan met één infiltratie- en onttrekkingsfilter over de volledige diepte van het eerste watervoerende pakket, zoals aangetoond door bijvoorbeeld Zuurbier et al. (2014). Ten tweede is ook het gebruik van horizontale putten ('Horizontal Directionally Drilled Wells' of HDDW) onderzocht, waarbij de horizontale put bovenin het eerste watervoerende pakket aangelegd wordt. Hierdoor wordt het zoete water geïnfiltreerd in het minder zoute deel van het watervoerende pakket en is het effect van opdrijving naar verwachting minder, doordat de zoetwaterbel zich met name bovenin het watervoerend pakket zal opbouwen.

6.1 Modelopzet

Voor het uitvoeren van de numerieke simulaties is gebruik gemaakt van MODFLOW 6 (Langevin et al., 2017). Voor het invoeren en wegschrijven van de invoerparameters is gebruik gemaakt van het Python-pakket FloPy (Bakker et al., 2016).

6.1.1 Geohydrologie

De geohydrologische schematisering in de modelstudie (Tabel 6-1) is gebaseerd op de boringen en sonderingen uitgevoerd in het gebied. Hierbij zijn de metingen op de locatie van Boring 02 (Figuur 3-1) als leidraad gebruikt, en op basis van de interpretatie hiervan (Paragraaf 3.3) is de verdeling van de lagen en de doorlatendheid van het eerste watervoerende bepaald. De weerstanden van de deklaag en beide kleilagen zijn ingeschat op basis van de boringen en sonderingen in dit project en daarnaast de database van doorlatendheden van kleilagen opgesteld door Van Leer et al. (2023).

De Boomse Klei, aanwezig in het gebied op ca. 85 m-mv, is als ondoorlatende hydrologische basis van het systeem beschouwd. Om de grote spreiding van de dikte van de deklaag en onderliggende kleilaagjes te ondervangen, werd Kleilaag 1 slechts in een deel van de modelvarianten (Paragraaf 6.2) meegenomen. Wanneer deze niet is meegenomen, zijn de eigenschappen op deze diepte dezelfde als van de rest van het eerste watervoerende pakket. De verticale doorlatendheid van de watervoerende pakketten is gebaseerd op een verticale anisotropie gelijk aan 5, een veelgebruikte waarde in Nederlandse watervoerende pakketten (Beernink et al., 2022). Voor de porositeit en de specifiek bergingscoëfficiënt zijn standaardwaarden aangenomen van respectievelijk 0,3 en $1,0E-5$.

De achtergrondstroming in het gebied is relatief laag (ordegrootte 5 m per jaar, zie Paragraaf 3.4) en is daarom niet meegenomen in de modelberekeningen. Verticale stroming is vanwege de dikke slecht doorlatende deklaag ook

niet meegenomen: initieel is er een hydrostatische drukverdeling in het model, met als basis een stijghoogte van 0 m NAP.

Als proxy voor het zoutgehalte in de ondergrond is gebruik gemaakt van de chlorideconcentratie. Het initiële verloop van de zoutconcentratie over de diepte is gebaseerd op de metingen van chlorideconcentratie uit DINOLoket (TNO, 2024) in het studiegebied, afgebeeld in Figuur 4-3. Op basis van deze metingen is de volgende lineaire trendlijn afgeleid voor het bepalen voor het verloop van de chlorideconcentratie over de diepte.

$$C_{cl} = -465,19 z - 1482,87$$

Waar C_{cl} [mg l⁻¹] de chlorideconcentratie is en z [m NAP] de diepte. Deze vergelijking is afgeleid aan de hand van metingen in het eerste watervoerende pakket, waar de gradiënt van zoet naar zout zeer sterk is (Figuur 4-3). Om onrealistisch lage en hoge waarden in ondiepere en diepere pakketten te voorkomen, is daarom een minimale chloride concentratie van 0,5 mg l⁻¹ en een maximale van 19,4 mg l⁻¹ (zeewater) aangehouden.

Tabel 6-1. Geohydrologische schematisering gebruikt in het grondwatermodel. *Kleilaag 1 niet in de basisassen meegenomen: Diepteinterval heeft dezelfde eigenschappen als de rest van WVP1.

Geohydrologische laag	Diepte (m-mv)	Horizontale doorlatendheid (m/d)	Verticale doorlatendheid (m/d)	Weerstand (d)	Formatie
Deklaag	0 – 12	0,15	0,015	800	Nieuwkoop, Naaldwijk
WVP 1a	12 – 19,25	15	3		Naaldwijk, Koewacht
Kleilaag 1*	19,25 – 20,75*	0,5*	0,005*	300*	Eem
WVP 1b	20,75 – 36	15	3		Eem, Waalre
Kleilaag 2a	36 – 37,5	0,12	0,024	62,5	Oosterhout
Kleilaag 2b	37,5 – 39,5	1,2	0,24	8,3	Oosterhout
WVP 2	39,5 – 85	15	3		Oosterhout

6.1.2 Bedrijfsvoering

Voor de bedrijfsvoering is uitgegaan van een versimpeld conceptueel systeem, met een vast infiltratie- en onttrekkingspatroon. Een dergelijke benadering is veelvuldig toegepast om het potentiële functioneren van ondergrondse waterbergingsystemen te onderzoeken (Ros & Zuurbier, 2017; Zuurbier et al., 2013, 2016), als ook bijvoorbeeld van bodemenergiesystemen (Beernink et al., 2024; Duijff et al., 2021). In dit onderzoek is de bedrijfsvoering als volgt opgebouwd:

- Ieder jaar is opgebouwd uit vier periodes, zijnde:
 - 1 Infiltratieperiode van 150 dagen, waarin het jaarlijkse opslagvolume met een constant debiet werd geïnfiltrerd.
 - 2 Opslagperiode van 30 dagen, waarin niets werd geïnfiltrerd of onttrokken.
 - 3 Onttrekkingsperiode van maximaal 150 dagen, waarin water wordt onttrokken met een onttrekkingsdebiet gelijk aan het infiltratiedebiet. Onttrekking stopt wanneer een bepaalde maximale chlorideconcentratie in het putfilter, de afkapconcentratie, wordt overschreden. Op dat moment begint de rustperiode.
 - 4 Rustperiode van minimaal 35 dagen waarin niets wordt geïnfiltrerd of onttrokken, vanaf het einde van de onttrekkingsperiode tot het begin van het nieuwe jaar.
- Het model is voor 10 jaar doorgerekend. Ieder jaar bestaat uit de bovenstaande 4 periodes.
- Wanneer een systeem bestaat uit meerdere filters en/of putten, wordt het debiet gelijkmatig verdeeld over de verschillende filters en/of putten.
- Voor iedere individuele put en/of filter wordt de chlorideconcentratie van het onttrokken water berekend en wordt deze individueel uitgeschakeld wanneer de afkapconcentratie wordt overschreden.

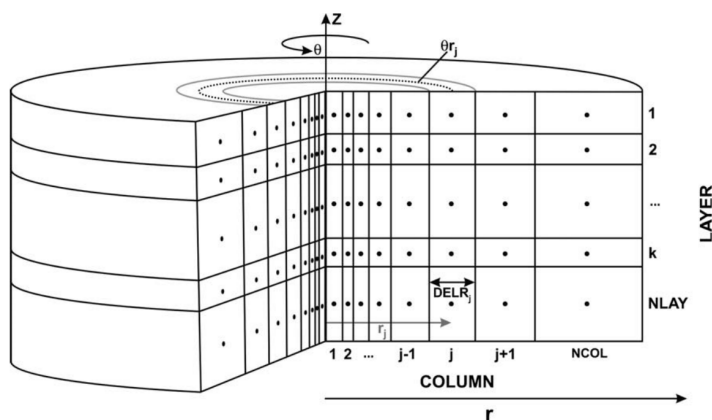
- Het geïnfiltreerde water heeft een chlorideconcentratie van 200 mg l^{-1} .
- De afkapconcentratie is gelijk gesteld aan 400 mg l^{-1} , binnen de bandbreedte die in de literatuur wordt genoemd als de maximaal toelaatbaar chlorideconcentratie voor aardappel en ui (Stuyt et al., 2016).
- De terugwinefficiëntie van het systeem voor ieder jaar is gedefinieerd als het percentage van het geïnfiltreerde zoetwatervolume dat in het de daarop volgende onttrekkingsperiode kon worden teruggewonnen ($V_{\text{uit}}/V_{\text{in}}$).

6.1.3 Discretisatie

Verticale putten

In de modelvarianten waarin verticale putten zijn gesimuleerd, zijnde een MPPW of een volledig verticale put, is gebruik gemaakt van een radiaal-symmetrisch grondwatermodel (Langevin, 2008). Hierbij zijn de putfilters geplaatst op $x = 0$ en is de aanname dat de bodemeigenschappen in alle richtingen vanaf de put hetzelfde zijn. Voordeel van deze toepassing is dat het wel tot 1000x zo snel is als een volledig 3D model. Nadeel is dat er slechts één put gemodelleerd kan worden, wat met name een beperking is voor grote systemen die in de praktijk meer dan een put nodig zullen hebben om de benodigde infiltratie- en onttrekkingscapaciteit te behalen.

In het model is voor verticale putten een minimale celgrootte van 0,25 meter gehanteerd in het eerste watervoerende pakket. De verticale celgrootte in de kleilagen direct onder en boven de putfilters is verder verfijnd tot 0,1 – 0,2 m, om stoftransport op de overgang van zand naar klei goed te kunnen modelleren. Verder naar de onderkant en bovenkant van het model neemt de celdikte toe. Ook horizontaal neemt de celgrootte geleidelijk toe vanaf de put. Voor modellen met een infiltratievolume van meer dan $100.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ is een iets grovere discretisatie gehanteerd, met een celgrootte bij de put van 0,50 meter i.p.v. 0,25.

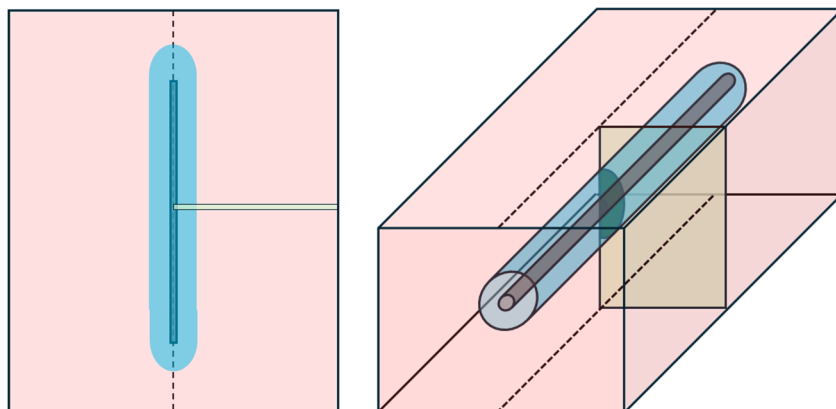


Figuur 6-1. Opbouw van een radiaal-symmetrisch grondwatermodel. Figuur uit Langevin (2008).

Horizontale putten

Bij horizontale putten ontstaat er in de regel een zeer langwerpige zoetwaterbel die voor een groot deel van zijn lengte een ongeveer constante breedte heeft (Figuur 6-2). Om deze reden is ervoor gekozen om de HDDW bij benadering te modelleren in een 2D-model. In dit geval is één segment van één meter lengte van de HDDW gemodelleerd. Aan de uiteinden van de HDDW geldt deze benadering niet door groter contactoppervlak tussen de zoetwaterbel en het grondwater, waardoor er meer menging zal plaatsvinden. Deze randeffecten zijn niet meegenomen in deze studie; het hier beschouwde 2D-model leidt daardoor tot iets gunstigere resultaten dan in een volledig 3D-model en in de praktijk. Omdat het gemodelleerde grondwatersysteem een symmetrieas heeft langs de lengte van de HDDW (stippellijn in Figuur 6-2), was het mogelijk de rekentijd van het model verder in te korten door slechts één van beide kanten te modelleren, met het midden van de HDDW op $x = 0$.

De minimale verticale en horizontale celgrootte in het model was 0,1 m bij de HDDW in het eerste watervoerende pakket en de omliggende kleilagen, met verdere vergroving naar de boven- en buitenranden. Voor systemen met een infiltratievolume van meer dan 100.000 m^3 per jaar was de minimale celgrootte 0,2 m.



Figuur 6-2. Schematische weergave van het 2D model gebruikt voor de modellering van de HDDW's met in groen de modeluitsnede. Links: bovenaanzicht. Rechts: 3D overzicht.

6.1.4 Randvoorwaarden en startcondities

Voor zowel het radiaal-symmetrische model als het 2D-model lag de modelrand 5 km van de putten af, met op de rand een randvoorwaarde voor zowel constante stijghoogte en constante concentratie, die gelijk waren aan de startcondities; een hydrostatische drukverdeling en een concentratieverdeling zoals beschreven in Paragraaf 6.1.1.

Dichtheidsstroming als gevolg van dichtheidsverschillen tussen zoet en zout water is meegenomen in de simulaties, gebruikmakend van een lineair verband tussen het zoutgehalte in de vorm van de chlorideconcentratie en de dichtheid van het grondwater. Om ondanks de dichtheidsverschillen hydrostatische initiële condities en randvoorwaarden in het model te creëren zijn de initiële stijghoogtes en stijghoogtes bij de randvoorwaarden gecorrigeerd op basis van de methoden beschreven door Langevin et al. (2019).

6.2 Modelvarianten

6.2.1 Geohydrologie en putontwerp

Uit de CPT-sonderingen in het studiegebied bleek een grote variatie van de dikte van de deklaag en de aanwezigheid van kleilagen in het eerste watervoerende pakket tot ca. 20 -m NAP (zie Figuur 3-4), en dat er geen duidelijk ruimtelijk patroon in deze spreiding te ontdekken was. De mogelijke putconfiguraties zijn sterk afhankelijk van deze kleilagen, omdat dit de bruikbare diepte en dikte van het eerste watervoerende pakket bepaalt. Dit geldt voor verticale putten, waar een dik genoeg zandig pakket aanwezig moet zijn om een filter van minimaal een paar meter te kunnen plaatsen, maar ook voor horizontale putten, waar juist in het horizontale vlak een constant aanwezig zandlaag nodig is voor het realiseren van een dergelijke put.

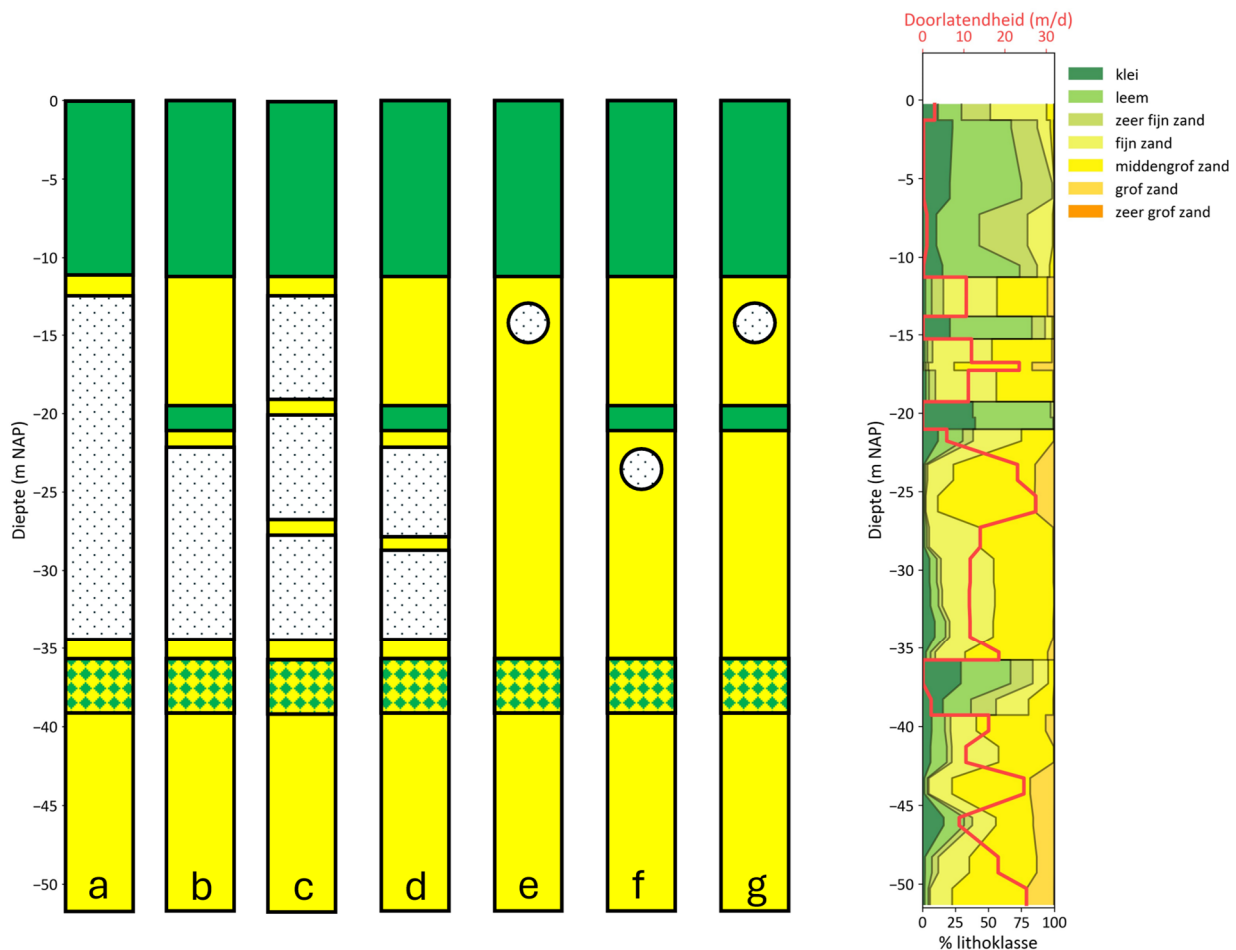
Om de onzekerheid in bodemopbouw en daarmee gepaard gaande mogelijke filterstellingen te ondervangen en het effect hiervan op de terugwinefficiëntie te onderzoeken, zijn verschillende combinaties van geohydrologie en daarbij passende filterstellingen gemodelleerd (Figuur 6-3). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen twee geohydrologie-configuraties: één mét aanwezigheid van de Eem Klei op -20 m NAP zoals aangetroffen in Boring 02 (zie Paragraaf 3.1), en één zonder de aanwezigheid van de Eem Klei. De aanname hierbij is dat bij aanwezigheid van de Eem Klei het stuk tussen de deklaag en de Eem Klei niet geschikt is voor het ontwikkelen van een verticaal filter, door bijvoorbeeld de aanwezigheid van andere kleilagen, waardoor alleen het stuk onder de Eem Klei gebruikt werd voor infiltratie.

Drie type systemen zijn doorgerekend in de modellering: een systeem met één volledig verticaal filter, een systeem met meerdere verticale filters (MPPW) en een systeem met horizontale putten (HDDW). Voor de drie type systemen is zowel de variant met filters met infiltratie over het gehele eerste watervoerende pakket als alleen onder de Eem Klei doorgerekend (Figuur 6-3 a-f). Bij de MPPW is er hierbij vanuit gegaan dat het systeem zonder

Eem Klei bestaat uit een put met 3 filters, waarbij enkel de bovenste twee gebruikt worden voor onttrekking (Figuur 6-3c), en mét Eem Klei uit een put met 2 filters, waarbij alleen uit de bovenste gebruikt wordt voor onttrekking (Figuur 6-3d). Voor de HDDW is daarnaast ook de variant onderzocht waarbij plaatsing boven de Eem Klei wel mogelijk is (Figuur 6-3g).

In de twee boringen uitgevoerd voor dit project, is de Oosterhout Klei op ca -35 tot -40 m NAP aangetroffen als weerstandslaag onderin het eerste watervoerende pakket (Paragraaf 3.3). De mate van weerstand die deze laag biedt is echter onzeker, mede doordat het sediment op deze diepte nog vrij zandig is (zie de korrelgrootteverdeling in Figuur 6-3) en op basis van het ondergrondmodel GEOTOP (Stafleu et al., 2013) is deze kleilaag niet overal even consistent aanwezig. Om de potentiële effecten van de afwezigheid van de Oosterhout Klei te onderzoeken, is ook een modelvariant waarin deze afwezig is doorgerekend. In dat geval waren de ondergrondeigenschappen op de diepte van de Oosterhout Klei gelijk aan die van het eerste watervoerende pakket. Met aanwezigheid van de Oosterhout Klei waren deze zoals gedefinieerd in Tabel 6-1.

In het model is de verticale afstand tussen verticale filters en de boven- en onderliggende kleilagen en verticale filters onderling 0,5 – 1 m. Horizontale putten zijn 2 meter onder de bovenliggende kleilaag geplaatst.



Figuur 6-3. Verschillende varianten voor de geohydrologie en het putontwerp gebruikt voor de modellering, alsmede de korrelgrootteverdeling van Boring 02 waarop de varianten gebaseerd zijn. N.B. De onderkant van het tweede watervoerende pakket ligt dieper dan hier afgebeeld, op -85 m NAP.

Basis, gunstig en ongunstig

Op basis van de beschikbare openbare data en het veldonderzoek is een goed beeld verkregen van de opbouw van de ondergrond in het projectgebied. Waardes voor de dispersiviteit en verhouding in doorlatendheid in verticale en

horizontale richting (anisotropie) van de ondergrond zijn zelfs na dergelijk veldonderzoek moeilijk in te schatten, terwijl deze mogelijk wel een grote invloed hebben op de terugwinefficiëntie van het systeem.

De dispersiviteit bepaalt samen met diffusie de mate van menging tussen het geïnfiltreerde zoete water en het al aanwezige zoute grondwater, en is afhankelijk van zowel de mate van heterogeniteit van de ondergrond als de schaal waarop de processen zich afspelen (Zech et al., 2019). De anisotropie is ook afhankelijk van de heterogeniteit als gevolg van gelaagdheid in de ondergrond en is daarmee van invloed op de mate van opdriving van de zoetwaterbel.

Om de onzekerheid in de waarden voor dispersie en anisotropie in doorlatendheid te ondervangen, is voor ieder modelvariant een basis, een gunstige en een ongunstige casus doorgerekend. Deze casussen zijn samengevat in Tabel 6-2. De hier gegeven waarde voor de dispersiviteit is de longitudinale dispersiviteit, parallel aan de stromingsrichting van het grondwater. De dispersiviteit loodrecht op de stroming ('transversaal') is voor iedere casus gelijk gesteld aan $1/10^e$ van de longitudinale dispersiviteit parallel aan de stroomrichting.

Tabel 6-2. Dispersiviteits en anisotropiewaarden voor de basis, gunstige en ongunstige casus doorgerekend voor iedere modelvariant.

Parameter	Ongunstig	Basis	Gunstig
Longitudinale dispersiviteit α_L (m)	2	1	0,5
Verticale anisotropie K_h/K_v	2	5	10

6.2.2 Jaarlijks opslagvolume

De toepassing van ondergrondse waterberging in Wolphaartsdijk is beschouwd op meerdere schaalniveaus: lokaal voor een enkele agrariër, collectief met meerdere agrariërs en regionaal voor een gehele polder, afwateringsgebied of het gehele projectgebied. Het opslagvolume van de ondergrondse waterberging is afhankelijk van deze schaal: bij een grootschalig regionaal systeem is er meer water nodig voor beregening, waardoor er meer geïnfiltreerd moet worden en er dus meer investering nodig is voor putten om een hoge infiltratiecapaciteit te creëren.

Om een beeld te krijgen van het functioneren van een ondergrondse waterberging op verschillende schaalniveaus, is het systeem doorgerekend voor meerdere opslagvolumes. De basisvariant is hier gelijk aan de hoeveelheid beschikbaar bij 100% afvang voor een (deelgebied van) een enkele agrariër volgens de beredenering in Paragraaf 5.3: ca. 53.000 m³ (later is deze waarde bijgesteld naar 56.000 m³, maar de modellen zijn gezien het kleine verschil niet opnieuw doorgerekend). De overige gemodelleerde jaarlijkse opslagvolumes zijn veelvoud van dit basisvolume (zie Tabel 6-3).

Voor verticale putten, zowel volledig filter als MPPW, was door de radiaal-symmetrische opzet van het model het slechts mogelijk één put te modelleren. Hierdoor was het pompdebiet in deze put in de varianten vanaf 106.000 m³/jaar hoger dan in de praktijk naar verwachting gehaald kan worden: 15 tot 20 m³ per uur op basis van de discussie in Paragraaf 5.2. Echter zal bij een systeem bestaande uit meerdere bij elkaar geplaatste putten er ook één zoetwaterbel ontstaan, waardoor de huidige modellering met één put een goede indicatie kon geven van het functioneren van een dergelijk systeem.

Voor de 2D-modellering van de horizontale putten was het wel mogelijk meerdere HDDW's te modelleren; hier schaalde het aantal HDDW's mee met het jaarlijkse opslagvolume (Tabel 6-3). Hierbij is een putafstand van 10 meter tussen de HDDW's aangenomen. Daarnaast was het voor de 2D-modellering van de HDDW-systemen van belang om een lengte van het systeem aan te nemen, zodat het gemodelleerde infiltratievolume per strekkende meter bepaald kon worden. In dit geval is ervan uitgegaan dat iedere HDDW 265 meter lang was, zodat het infiltratievolume per strekkende meter gelijk was aan 200 m³ per jaar. Dit zit in de orde grootte van andere systemen met horizontale putten, zoals op Texel (Merton et al., 2023) en de Freshmaker in Ovezande (Zuurbier et al., 2018b).

Tabel 6-3. Doorgerekende opslagvolumes, het bijbehorende infiltratiedebiet voor 150 dagen constant infiltreren en het aantal benodigde HDDW's dat voor betreffende opslagvolumes is gemodelleerd voor aangenomen HDDW lengte van 265 m en debiet van 200 m³/jaar per strekkende meter. *Geschatte aantal benodigde (verticale) OWB putten is een minimale waarde op basis van aangenomen debiet per put van 15 m³/u, maar dit is niet expliciet meegenomen in de modelering.

Opslagvolume (m ³ per jaar)	Infiltratiedebiet (m ³ per uur)	Aantal HDDW's	Aantal OWB putten*
26.500	7,4	1	1
53.000	14,7	1	1
106.000	29,4	2	2
159.000	44,2	3	3
212.000	58,9	4	4
265.000	73,6	5	5

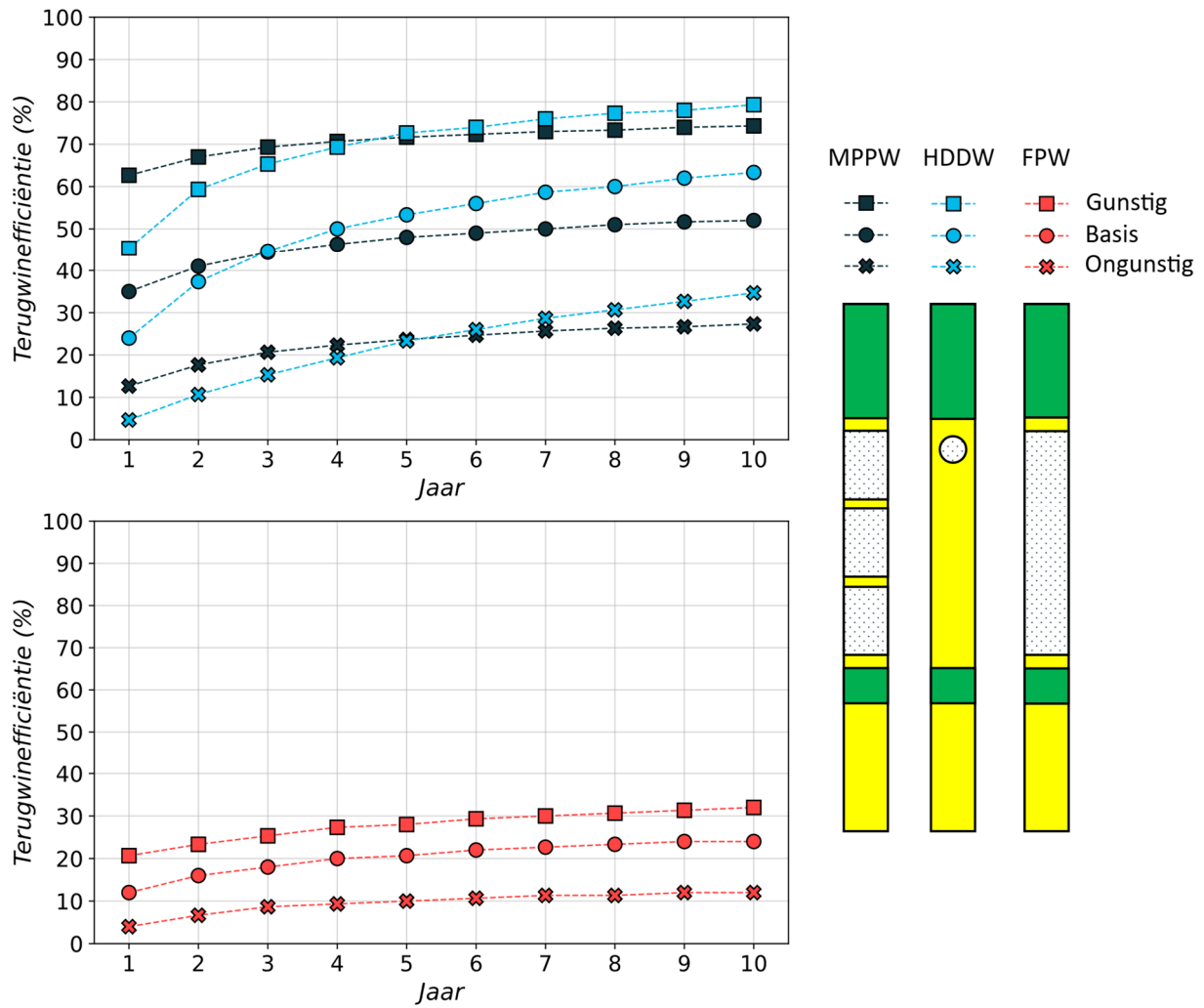
6.3 Modelresultaten

6.3.1 Putontwerp

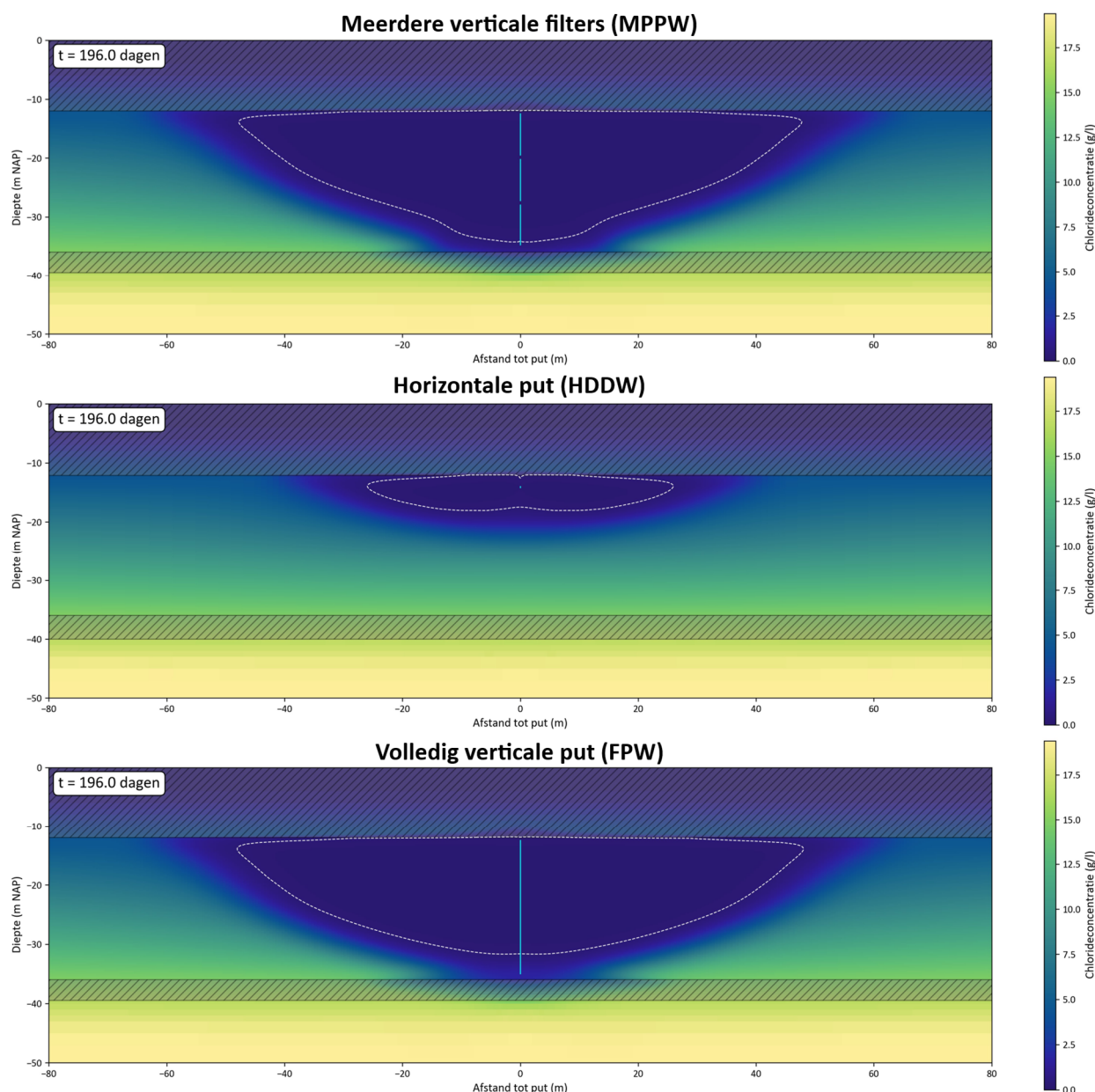
Uit Figuur 6-4 blijkt dat de terugwinefficiënties voortkomend uit de verschillende casussen voor MPPW en HDDW relatief vergelijkbaar zijn (Figuur 6-4, boven). Uit de modelberekeningen blijkt dat in alle drie de casussen de terugwinefficiëntie van de MPPW in de eerste jaren hoger was, maar dat vanaf 3 tot 5 jaar na de start de HDDW juist iets gunstiger was. Daarnaast was voor beide type systemen het verschil tussen de basis casus, de gunstige casus en de ongunstige casus relatief groot. In de ongunstige casus, met veel opdrijving door de lage anisotropie en veel dispersie, was het opslagrendement op lange termijn ca. 20-30%, terwijl dit voor de basis casus 50-60% was en voor de gunstige casus 70-80%. Het verschil in geohydrologische condities heeft dus een grote invloed op het potentiële functioneren van het systeem.

In vergelijking met de MPPW en de HDDW leverde het volledige verticale filter ('fully penetrating well', FPW) voor alle drie de casussen een relatief laag opslagrendement op. Doordat bij dit type putontwerp tot onderin het eerste watervoerende pakket onttrokken wordt, is hier relatief snel dieper zout water naar de put getrokken, zoals te zien is in het bovenste figuur in Figuur 6-5. Hierdoor kwam de gemiddelde concentratie in de put al snel boven de afkapconcentratie uit. Bij de MPPW werd alleen uit de bovenste twee filters onttrokken, waardoor het zoute water later deze onttrekkingsfilters bereikte (Figuur 6-5, bovenste figuur) en er dus langer onttrokken kon worden. Bij toepassing van verticale putten is MPPW dus een stuk gunstiger dan een volledig filter. Deze laatste is dan ook niet meegenomen in de rest van de modelresultaten.

Voor de HDDW (Figuur 6-5, middelste figuur) ontwikkelde de zoetwaterbel zich enkel bovenin het eerste watervoerende pakket. De afgebeelde zoetwaterbel lijkt hier relatief klein; dit komt doordat bij de HDDW een langgerekte zoetwaterbel ontstaat langs de lengte van de HDDW van 265 meter, terwijl bij de verticale putten zich een cirkelvormige bel met een straal vormt.



Figuur 6-4. Terugwinefficiëntie voor een ondergrondse waterberging met een jaarlijks opslagvolume van 53.000 m³ voor verschillende putontwerpen: meerdere verticale filters (MPPW), een horizontale put (HDDW) en een volledig verticaal filter ('fully penetrating well', FPW). Voor ieder putontwerp zijn 3 casussen weergegeven, zoals omschreven in Paragraaf 6.4.3.



Figuur 6-5. Doorsnedes de chlorideconcentratie in de ondergrond na 206 dagen, 16 dagen na de start van de eerste onttrekkingsperiode, voor een MPPW (boven) een HDDW (midden) en een volledig verticale put (onder) in de basiscasus. De witte lijn stippellijn is de grens van de afkapconcentratie (400 mg Cl/l). In lichtblauw zijn de putten weergegeven. Bij de volledig verticale put is de afkapconcentratie op dit tijdstip al overschreden en de onttrekking dus stopgezet.

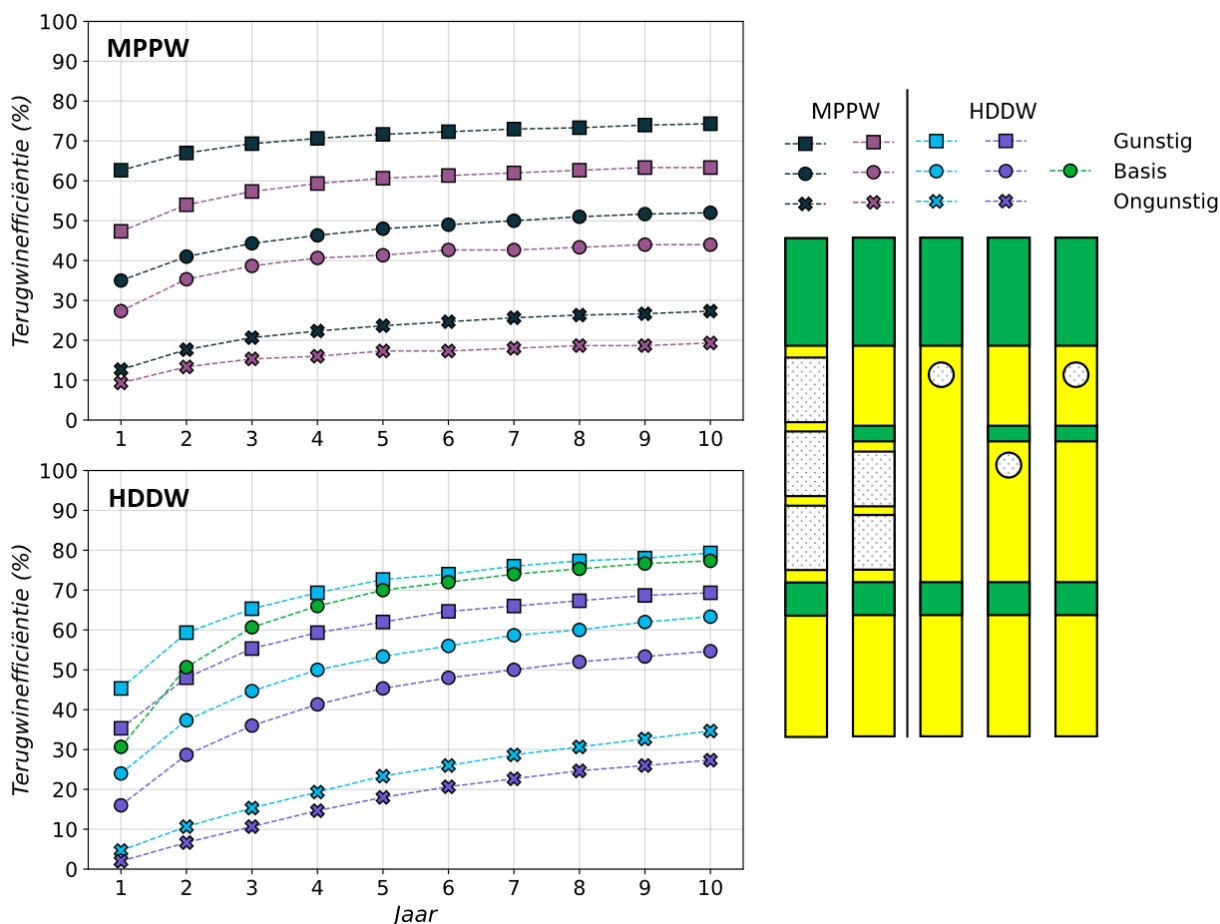
6.3.2 Bruikbare diepte eerste watervoerende pakket

Binnen het studiegebied is er variatie in de dikte van de deklaag en de aanwezigheid van andere storende kleilagen onder de deklaag. Hierdoor is de bruikbare dikte en diepte van het eerste watervoerende pakket sterk variabel (Paragraaf 3.3). Om de mogelijke invloed als gevolg van deze onzekerheid te ondervangen zijn modelvarianten met en zonder de voornaamste ondiepe kleilaag (de Eem Klei) uitgevoerd. De resultaten van deze modellering zijn weergegeven in Figuur 6-6.

Uit de modellering blijkt dat zowel voor MPPW als voor HDDW systemen de terugwinefficiëntie voor de basis, gunstige en ongunstige casus ca. 5-10% afneemt wanneer alleen het diepere deel van het eerste watervoerende pakket beschikbaar is voor ondergrondse waterberging. Oorzaken hiervan waren grotere opdrijving doordat opslag enkel plaatsvindt in het diepere, zoutere deel van het eerste watervoerende pakket, en meer opkegeling van zout water uit het tweede watervoerende pakket doordat onttrekking dicht bij de Oosterhout Klei, onderaan WVP1,

plaatsvond. Daarnaast is het mogelijk dat bij de MPPW de andere putconfiguratie, met twee in plaats van drie putfilters, ook een rol speelt in de snellere verzilting van het bovenste putfilter.

Ook is een variant doorgerekend waarbij de HDDW bóven deze ondiepe kleilaag geplaatst kon worden (groene lijn onder in Figuur 6-6). Een dergelijk dun pakket bleek gunstig voor het opslagrendement van een HDDW, doordat de onderliggende kleilaag hier opkegeling van dieper zout water tegen ging. Het opslagrendement lag hierdoor ca. 15% hoger dan in het geval dat de ondiepe kleilaag niet aanwezig was.



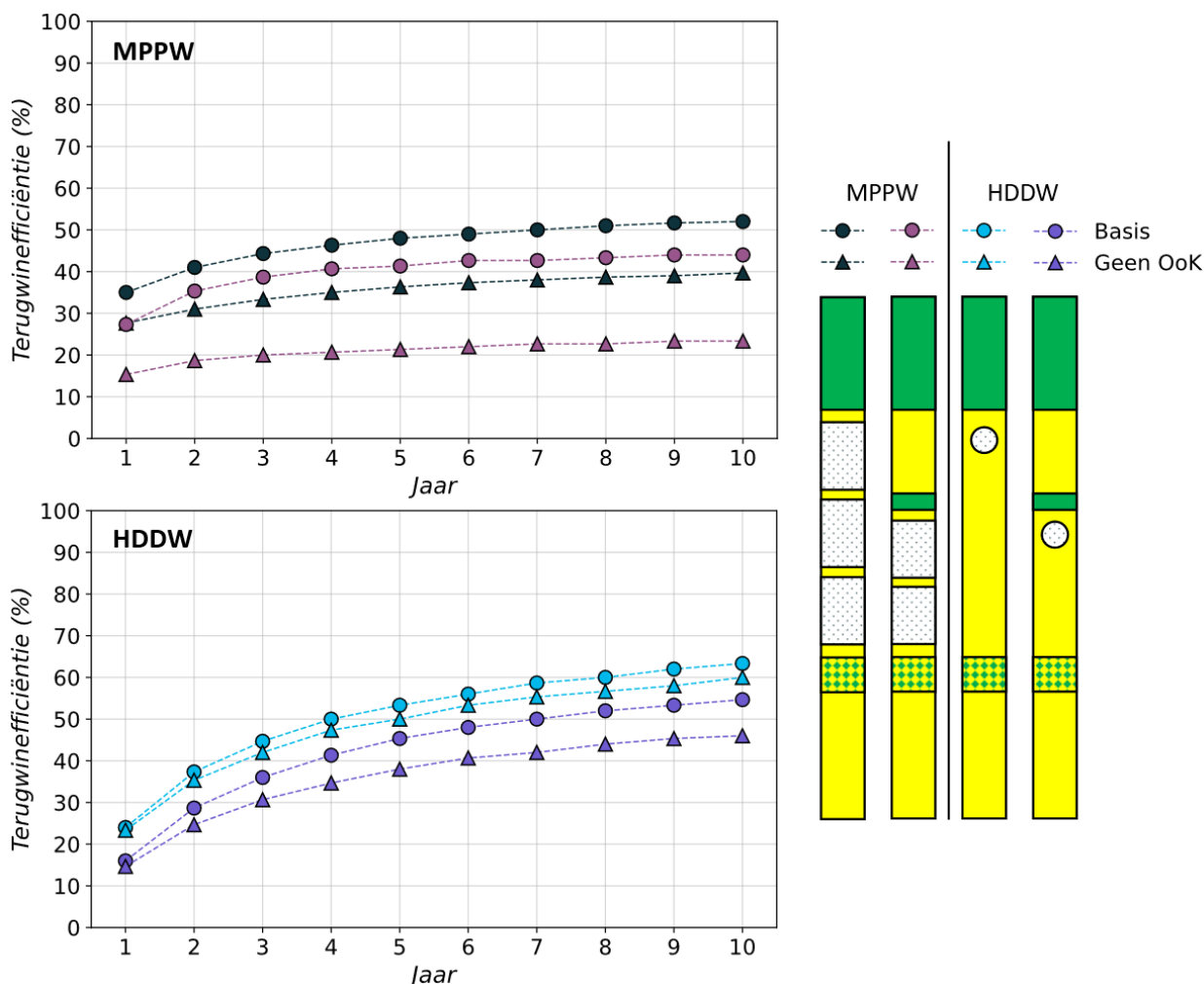
Figuur 6-6. Terugwinefficiëntie van een ondergrondse waterberging met een jaarlijks opslagvolume van 53.000 m³: vergelijking tussen de situatie met en zonder de aanwezigheid van een ondiepe kleilaag. Boven: meerdere verticale filters (MPPW). Onder: een horizontale put (HDDW), waarbij ook een variant is doorgerekend met de HDDW bóven de ondiepe kleilaag. Voor ieder putontwerp zijn 3 casussen weergegeven, zoals omschreven in Paragraaf 6.4.3.

6.3.3 Weerstand Oosterhout Klei

De Oosterhout Klei vormt de scheidende laag tussen het eerste en tweede watervoerende pakket in het gebied. Het is echter niet geheel duidelijk of deze overall in het gebied aangetroffen wordt en in hoeverre deze laag weerstand biedt. In de hiervoor besproken simulaties was de Oosterhout Klei telkens aanwezig als laag met een weerstand.

De basiscasus van de verschillende varianten is doorgerekend voor het geval dat de Oosterhout Klei niet aanwezig is. De vergelijking tussen de varianten met en zonder Oosterhout Klei zijn weergegeven in Figuur 6-7. Uit de modelresultaten blijkt dat de terugwinefficiëntie bij afwezigheid van de Oosterhout Klei voor alle vier de varianten afneemt, afhankelijk van de modelvariant 3% tot 20%. De terugwinefficiëntie voor een MPPW is gevoeliger voor de aanwezigheid van de Oosterhout Klei dan van een HDDW, doordat er bij de MPPW meer water dieper uit het pakket werd onttrokken en er meer opkegeling van zout water uit het tweede watervoerende pakket optreedt.

Voor zowel MPPW als HDDW was het effect daarnaast groter bij aanwezigheid van de ondiepe Eem Klei, doordat in die modelvariant alleen het diepere deel van het eerste watervoerende pakket voor opslag gebruikt kon worden.



Figuur 6-7. Terugwinefficiëntie van een ondergrondse waterberging met een jaarlijks opslagvolume van 53.000 m³: vergelijking tussen de situatie met en zonder de aanwezigheid van de Oosterhout Klei. Boven: meerdere verticale filters (MPPW). Onder: een horizontale put (HDDW). Voor ieder putontwerp is alleen de basiscasus, zoals omschreven in Paragraaf 6.4.3, weergegeven.

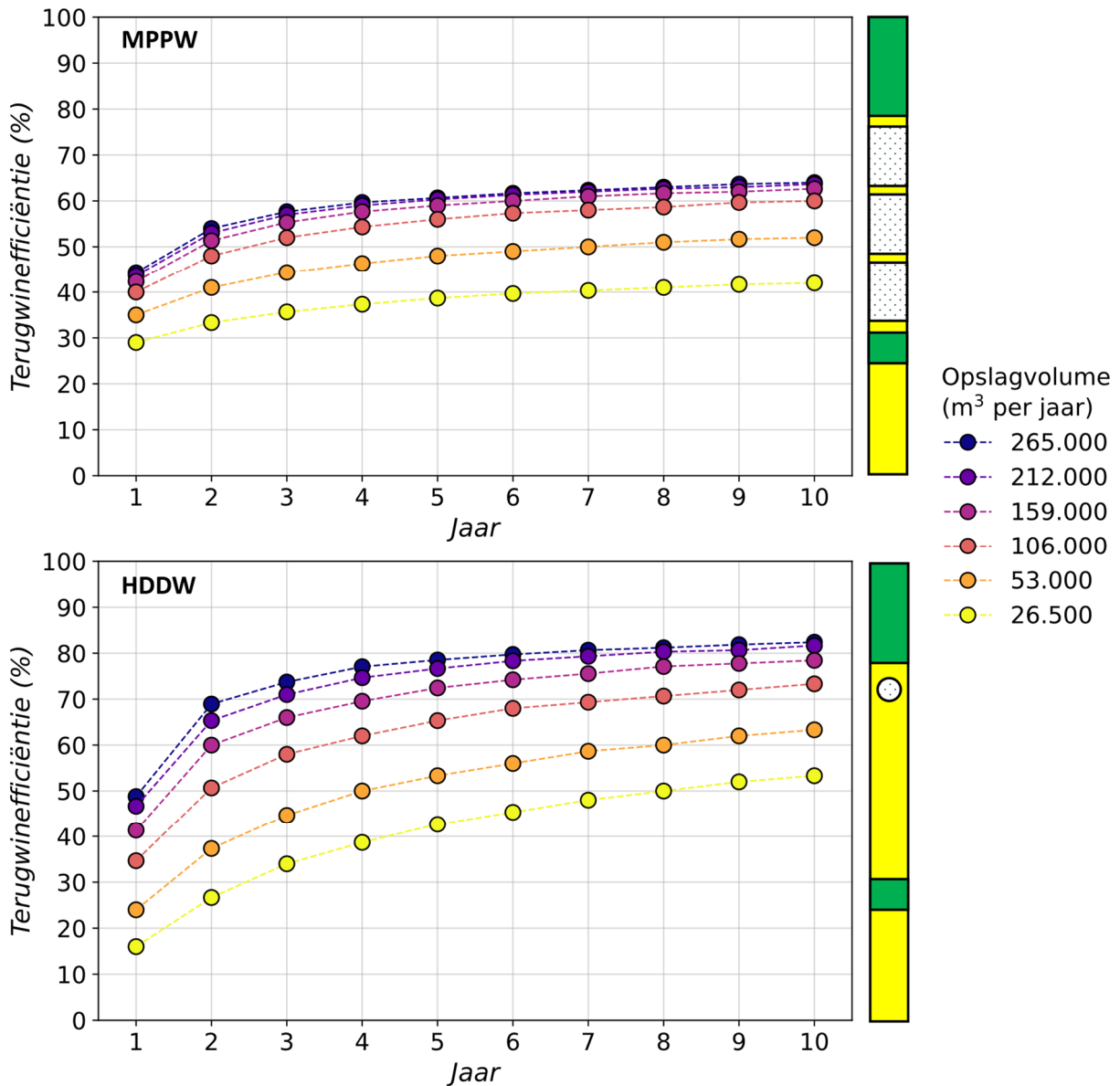
6.3.4 Opslagvolume

Het uiteindelijke jaarlijkse opslagvolume in de ondergrondse waterberging is afhankelijk van de toepassingschaal en de bijbehorende waterbeschikbaarheid en -vraag. Om inzicht te krijgen in de terugwinefficiëntie voor verschillende schaalgroottes, is een bandbreedte aan mogelijke opslagvolumes gemodelleerd voor zowel een systeem met verticale filters (MPPW) als horizontale putten (HDDW) voor de basiscasus.

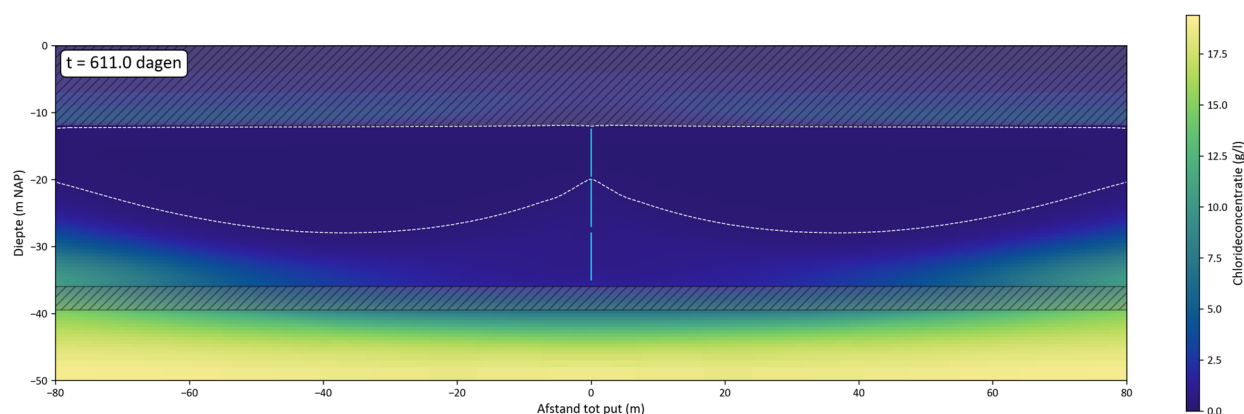
De resultaten (Figuur 6-8) laten zien dat ook bij een klein opslagvolume van 26.500 m³/jaar er op termijn mogelijk een terugwinrendement van 40% á 50% behaald kan worden. Voor zowel MPPW als HDDW neemt de terugwinefficiëntie echter wel toe met het opslagvolume. Bij opschaling van een ondergrondse waterberging zou dus relatief meer van het geïnfilterde zoete water kunnen worden teruggewonnen. Wel neemt de relatieve verbetering van de terugwinefficiëntie af naarmate het opslagvolume verder toeneemt. Vanaf een jaarlijks opslagvolume 106.000 m³ voor MPPW en 159.000 m³ voor HDDW is het effect van verdere opschaling relatief klein. Dit hing met name voor MPPW samen met opkegeling van zout grondwater uit het tweede watervoerende pakket en vermenging met het zoete infiltratiewater. Hierdoor zijn bij grote volumes de putfilters al verzilt terwijl er nog een groot volume aan zoet water aanwezig is in de ondergrond (Figuur 6-9). Omdat in het model het volledige debiet voor MPPW met 1 put is gesimuleerd, was dit effect van zeer lokale opkegeling naar verwachting sterker dan

in de praktijk, waar het injectie- en onttrekkingsdebiet voor deze grote volumes alleen verdeeld over meerdere putten gerealiseerd zou kunnen worden.

Voor HDDW was bij opschaling eenzelfde effect in minder sterke mate waarneembaar. Doordat de horizontale putten relatief dicht bij elkaar geplaatst werden in het model (onderlinge afstand van 10 meter), nam de opkegeling toe bij een groter onttrekkingsdebiet. Hierbij trad de meeste opkegeling plaats bij de middelste horizontale put(ten).



Figuur 6-8. Terugwinefficiëntie van een ondergrondse waterberging met verschillende jaarlijkse opslagvolumes. Boven: meerdere verticale filters (MPPW). Onder: een horizontale put (HDDW). Voor ieder putontwerp is alleen de basiscasus, zoals omschreven in Paragraaf 6.4.3, weergegeven.



Figuur 6-9. Doorsnede van de chlorideconcentratie in de ondergrond na 611 dagen voor een MPPW met een jaarlijks opslagvolume van 265.000 m³, 66 dagen na de start van de onttrekkingsperiode in het tweede jaar, vlak voor doorbraak van brak/zout water in het bovenste putfilter. In lichtblauw zijn de putfilters weergegeven. De witte lijn stippellijn is de grens van de afkapconcentratie (400 mg Cl/l).

6.4 Terugvertaling modelresultaten naar de praktijk

6.4.1 Doelmatigheid

Uit de modelresultaten is gebleken dat een deel van het zoete water dat in de winter werd geïnfilteerd, in de zomer kon worden teruggewonnen. Welk percentage kon worden teruggewonnen, fluctueerde echter sterk tussen de verschillende modelvarianten; in een ongunstig geval was dit na 5 jaar 20-30%, gemiddeld gezien zo'n 50% en in een gunstig geval zo'n 70-80%. Het uiteindelijke doel is echter niet om per se hoge terugwinefficiënties te behalen maar om zo doelmatig mogelijk aan een bepaalde watervraag te kunnen voldoen (tegen zo min mogelijk inspanning en kosten). Omdat met grotere systemen een hogere terugwinefficiëntie behaald kan worden (Figuur 6-8) is er relatief minder infiltratiecapaciteit (putten) en minder bovengronds buffervolume nodig om in dezelfde watervraag te voorzien en kan er efficiënter met de voor infiltratie beschikbare hoeveelheid water omgegaan worden.

6.4.2 Onzekerheid over de ondergrondeigenschappen

Dit onderzoek illustreert dat de representatieve waarden voor de anisotropie en dispersiviteit van het watervoerend pakket gebruikt voor opslag een grote invloed hebben op het berekende opslagrendement. Beide parameters zijn a priori lastig in te schatten. De gevoeligheid van de terugwinefficiëntie van ondergrondse waterberging voor deze twee parameters hangt samen met het hoge zoutgehalte van het grondwater in Wolphaartsdijk dat de opdrijving versterkt en zorgt voor een zeer kleine tolerantie voor menging (2,2%).

De berekende terugwinefficiënties bleken ook zeer gevoelig voor de aan- of afwezigheid van de Oosterhout Klei (Paragraaf 6.3.3). Op de twee boorlocaties in dit project (Paragraaf 3.3) was de Oosterhout Klei duidelijk aanwezig en is er dus in ieder geval iets van weerstand tussen het eerste en tweede watervoerende pakket. Daarbij is in de modellen uitgegaan van een vrij lage weerstand van ca. 70 dagen, afgeleid uit de korrelgrootteverdeling waarin de Oosterhout Klei vrij zandig leek en de dikte van de laag. Daarnaast is ook verkend wat de gevolgen zouden zijn als deze weerstandslaag totaal afwezig is. In REGIS II (Vernes & van Doorn, 2005) is een weerstand van ergens tussen de 100 en 1000 dagen berekend voor de Oosterhout Klei. Bij een hogere weerstand zal de opkegeling van diep zout water in de praktijk dus minder sterk optreden dan in de modellen het geval was.

De mate van gevoeligheid hing samen met de diepte waarop grondwater onttrokken werd: wanneer gemiddeld ondieper onttrokken werd was de gevoeligheid relatief klein (bijv. bij horizontale putten en in de variant zonder ondiepe kleilagen), doordat opkegelend zout water minder snel het onttrekkingsfilter bereikte. Met name in de modelvarianten met verticale putten en bij grote opslagvolumes bleek een lage weerstand van de Oosterhout klei negatief door te werken op het opslagrendement vanwege sterke opkegeling van het diepere zoute grondwater (zie Figuur 6-9). Bij deze modelvarianten met grote volumes was dit effect echter mogelijk sterker dan in de praktijk het geval zal zijn, omdat dergelijk grote volumes niet geïnfilteerd en onttrokken kunnen worden uit slechts één

put, zoals hier aangenomen. Bij een puttenveld van meerdere putten op enige afstand van elkaar is de stijghoogteverlaging bij onttrekking meer gespreid waardoor er vermoedelijk minder opkegeling zal plaatsvinden.

De aan- of afwezigheid van ondiepere kleilagen, bovenin het eerste watervoerende pakket bepaalt vanaf welke diepte het eerste watervoerende pakket gebruikt kan worden voor ondergrondse waterberging. Uit de in dit project uitgevoerde sonderingen is gebleken dat op veel locaties ondiepe kleilagen onder de deklaag zijn aangetroffen, maar dat hier geen duidelijk ruimtelijk patroon uit op te maken is (Paragraaf 3.3). In de praktijk zal de filterstelling dus afhankelijk zijn van de lokaal aangetroffen bodemopbouw. Uit de modelresultaten blijkt dat het gunstiger is als het eerste watervoerende pakket zo ondiep mogelijk gebruikt kan worden. Enerzijds doordat het pakket ondieper vaak wat minder zout zal zijn, waardoor hier opdrijving en vermenging minder effect zullen hebben. Anderzijds hoeft in dat geval minder dicht bij de onderkant van eerste watervoerend pakket onttrokken te worden, wat zeker bij een beperkte weerstand van de Oosterhout Klei een groot effect kan hebben op de terugwinefficiëntie.

6.4.3 Verschillen tussen de systeemconfiguraties

Verschillende putconfiguraties

Uit de modelresultaten bleek dat zowel de toepassing van meerdere verticale filters (MPPW) als horizontale putten (HDDW) leiden tot hogere terugwinefficiënties dan het gebruik van één volledig verticaal filter (FPW). De berekende terugwinefficiëntie van MPPW en HDDW voor equivalente varianten met dezelfde opslagvolumes en geohydrologische omstandigheden waren onderling redelijk vergelijkbaar, waarbij MPPW in de eerdere jaren en HDDW naar verloop van tijd, met name bij grotere opslagvolumes, iets gunstiger naar voren kwam. Door de verschillende opzet en aannames die gebruikt zijn voor beide systeemtypes, vallen deze verschillen echter binnen de marge van de onzekerheid. Voor de afweging van de inrichting van een ondergrondse waterbergingsstelsel in de praktijk zullen gedetailleerdere modelsimulaties gevoed met locatie-specifieke bodemopbouw en eigenschappen nodig zijn.

Infiltratie en onttrekkingsschema

In deze studie is voor de modellering voor ieder jaar een infiltratie- en onttrekkingperiode van ieder 150 dagen aangenomen met een vast debiet, met een tussenliggende rustperiode van 30 dagen. In de praktijk zal infiltratie veel variabelere plaatsvinden en afhankelijk zijn van de variabele patronen in neerslag en afvoer drain- en/of oppervlaktewater. Uit de analyse in Paragraaf 5.2.3 is dan ook gebleken dat ook in het natte seizoen periodes zullen voorkomen waarin minder of helemaal niet geïnfiltrerd kan worden. Anderzijds zal ook onttrekking niet constant over 150 dagen plaatsvinden, maar zal dit afhankelijk zijn van de watervraag van de gewassen en de regenval gedurende het groeiseizoen. In de geschatte watervraag uitgewerkt in Paragraaf 5.3 zou een agrariër op maximaal 6 momenten zoet water nodig hebben (4 keer voor uien en 2 keer voor aardappelen). Volgens deze aanname zou dus slechts gedurende een relatief korte periode onttrokken worden.

De timing en lengte van de infiltratie- en onttrekkingperiodes werken door in het opslagrendement van het systeem. Wanneer er langer zit tussen infiltratie en onttrekking, kan er meer opdrijving plaatsvinden en zal de terugwinefficiëntie afnemen. De onzekerheid in de jaarlijkse infiltratie en onttrekkingdynamiek kan deels worden ondervangen door, wanneer mogelijk, ruimer te infiltreren dan naar verwachting nodig voor een extreem jaar. Hoewel dit deels ten koste gaat van de doelmatigheid, zorgt een resterend deel zoet water dat achterblijft in de ondergrond voor een positief effect op de terugwinefficiëntie in het daaropvolgende jaar.

7 Inpassing OWB bij verschillende schaalgroottes

Uit de grondwatermodellering (Hoofdstuk 6) is gebleken dat de toepassing van ondergrondse waterberging (OWB) in Wolphaartsdijk op zowel kleine schaal als grote schaal kan bijdragen aan de zoetwaterbeschikbaarheid in de zomer, ondanks de uitdagende omstandigheden door het hoge zoutgehalte van het grondwater. Voor verschillende schaalniveaus gelden in de praktijk echter verschillende uitdagingen. Aangezien de prestaties van OWB met MPPW dan wel HDDW, met de aannames in deze studie, onderling weinig verschillen is de inpassing van OWB in Wolphaartsdijk van beide putconfiguraties gezamenlijk beschouwd op basis van indicatieve waarden.

De mogelijke toepassing van een OWB wordt hier op 3 schaalniveaus conceptueel beschouwd op basis van het studiegebied: individueel, collectief en regionaal. Bij een individueel systeem is het uitgangspunt dat een OWB wordt aangelegd voor het voorzien van een gebied van 40 ha van één (relatief kleine) agrariër in het gebied. Bij een collectief systeem is ervan uitgegaan dat enkele (2 tot 4) agrariërs in het gebied gezamenlijk één OWB aanleggen voor het voorzien van een gebied van 200 ha. Bij het regionale systeem werkt het gehele studiegebied (630 ha in totaal) samen voor de aanleg van één OWB.

Uitgangspunt van deze analyse is de inschatting van de watervraag en waterbeschikbaarheid zoals uitgewerkt in Paragraaf 5.3. De vertaling van deze watervraag en de waterbeschikbaarheid naar de verschillende schaalniveaus is gegeven in Tabel 7-1. Vervolgens is een inschatting gemaakt van het aantal benodigde putten voor de infiltratie van de gemiddelde waterbeschikbaarheid. Hiervoor is een putdebiet aangenomen van 15 m³/uur (Paragraaf 5.2.1) en een benutting van de putten van 45% van de maximale capaciteit tijdens het winterhalfjaar (Paragraaf 5.2.4). Dit komt neer op een infiltratiecapaciteit van ca. 30.000 m³ per put in het winterhalfjaar. De minimaal benodigde infiltratie is afgeleid van de watervraag en de gesimuleerde terugwinefficiënties voor de verschillende infiltratievolumes in het 3^e jaar (Figuur 6-8).

Tabel 7-1. Indicatief overzicht van de uitgangspunten voor de beschouwing van de toepassing van OWB op meerdere schaalniveaus bij toepassing MPPW/HDDW. Achterliggende aannames voor de watervraag en waterbeschikbaarheid zijn uitgewerkt in Paragraaf 5.3, minimaal benodigde infiltratie op basis van de terugwinefficiënties volgend uit de modelsimulaties in Paragraaf 6.3. Verder zijn een putdebiet van 15 m³/uur (Paragraaf 5.2.2) en een benutting van de putten van 45% (Paragraaf 5.2.4) aangenomen. Onder de aannames van deze studie zijn voor MPPW en HDDW het aantal benodigde putten voor een bepaald infiltratiedebiet gelijk (Tabel 6-3) en de terugwinefficiënties voor verschillende opslagvolumes vergelijkbaar (Figuur 6-8).

	Individueel	Collectief	Regionaal
Schaal	(deelgebied van) één agrariër	Enkele bedrijven	Het hele studiegebied
Areaal Totaal (ha)	40	200	630
Watervraag Totaal (m ³ /jaar)	8.800	44.000	138.600
Maximale infiltratie op basis van waterbeschikbaarheid bij evenredige verdeling			
Gemiddelde waterbeschikbaarheid (m ³ /jaar)	56.280	281.400	886.410
Aantal putten nodig voor infiltratie	2	10	30
Benodigde infiltratiecapaciteit (m ³ /uur)	28	136	428
Minimaal benodigde infiltratie om aan watervraag te kunnen voldoen			
Inschatting terugwinefficiëntie (%)	35	55	60
Minimaal benodigde infiltratie (m ³ /jaar)	25.143	80.000	231.000
Aantal putten nodig voor infiltratie	1	3	8
Benodigde infiltratiecapaciteit (m ³ /uur)	13	41	118

7.1 Individueel

Een individueel systeem bestaat uit een relatief kleine ondergrondse waterberging die slechts één agrariër hoeft te voorzien; in dit voorbeeld een agrariër met een areaal van 40 ha (binnen het projectgebied) en een totale bijbehorende watervraag van 8.800 m³. Bij volledige benutting van het water dat deze agrariër tot zijn beschikking heeft bij 'evenredig verdelen', het verdelen van het afstromende water uit de polder naar rato van zijn landbouwareaal, zou er op basis van zijn areaal 56.280 m³ per jaar beschikbaar zijn voor infiltratie (Tabel 7-1). In dat geval zou het benodigde opslagrendement van de ondergrondse waterberging 16% moeten zijn. Uit de modelsimulaties in Hoofdstuk 6 met een opslagvolume van 53.000 m³ is gebleken dat een dergelijk opslagrendement ook op deze schaal in de meeste varianten haalbaar is. In enkele simulaties met ongunstige ondergrondcondities werd dit opslagrendement gedurende de eerste jaren bij zowel voor meerdere verticale filters (MPPW) als een horizontale put (HDDW) echter niet behaald. Een dergelijk kleine ondergrondse waterberging is dan ook het meest gevoelig voor de effecten van vermenging en opdrijving van het geïnfiltreerde zoete water.

Bij aannahme van een terugwinrendement van 35% zou er in deze modelvariant ieder jaar minimaal 25.143 m³ geïnfiltreerd moeten worden om aan de watervraag te voldoen. Op basis van de genoemde cijfers zou deze hoeveelheid ruimschoots beschikbaar moeten zijn. Dit zou krapper worden wanneer alleen oppervlaktewater met een EC van minder dan 1,5 mS/cm gebruikt wordt, waardoor naar schatting slechts 33% van het wegstromende oppervlaktewater beschikbaar is (Paragraaf 5.2.1). Bij 'evenredig verdelen' zou er dan slechts ca. 17.600 m³ beschikbaar zijn, te weinig om aan de vraag te voldoen.

Zeker bij een dergelijk kleinschalig systeem is drainwater ook een potentiële bron voor infiltratie. Het voordeel van drainwater is dat de kwaliteit van het water over het algemeen hoger is (met name minder zwevende stof, zie Paragraaf 4.1.2), waardoor de zuiveringsinspanning af zou nemen. Op dit moment is er echter nog geen ervaring met samengestelde drainage in het gebied en is dus ook niet bekend hoeveel drainwater op die manier afgevangen kan worden. Dit zou dus verder onderzocht moeten worden. Een bijkomende voordeel van samengestelde drainage is dat de benodigde bovengrondse buffering in de percelen zelf gerealiseerd kan worden, en er dus geen bassin nodig is voor de bovengrondse buffering van water voor infiltratie.

Het areaal van de agrariër in dit voorbeeld is 13% van het totale areaal van de polders die afwateren op Stuw Batterijweg en de waterbeschikbaarheid is dus bij evenredig verdelen 13% van de gemiddeld wegstromende hoeveelheid oppervlaktewater bij deze stuw. Wanneer er slechts één individueel systeem in dit gebied aanwezig is, is de wijze van verdeling van het water geen punt omdat verder niemand aanspraak maakt op het afstromende water. Wanneer verschillende agrariërs in het gebied een individueel systeem aanleggen, is het benoemde maximale volume meer van belang. In dat geval zullen er dus duidelijke afspraken gemaakt moeten worden over het afvangen van het oppervlaktewater, zeker voor relatief droge jaren.

Voor het infiltreren van de genoemde opslagvolumes is naar verwachting slechts één tot enkele (verticale) putten nodig. Qua ontwerp zou een dergelijk systeem veel gelijkenissen hebben met bestaande ondergrondse waterbergingsystemen in bijvoorbeeld de glastuinbouw. Een voordeel van een dergelijk kleinschalig systeem is dat het benodigde leidingwerk beperkt is doordat slechts één agrariër en een beperkt gebied vanaf de put van water voorzien hoeft te worden. Een nadeel is dat de investeringskosten voor de aanleg van een klein systeem relatief groot zullen zijn, omdat bij een groter systeem door de hogere terugwinefficiëntie per kuub geleverd water minder putten nodig zijn, en de kosten voor aanschaf van putten en voorzuivering gedeeld worden.

7.2 Collectief

Bij een collectief systeem werken meerdere agrariërs samen om één gezamenlijke ondergrondse waterberging op te zetten. Een belangrijk voordeel van een grootschaliger gezamenlijk systeem is dat de grotere zoetwaterbel leidt

tot hogere terugwinefficiënties dan bij kleinere individuele systemen. De gevoeligheid voor ongunstige ondergrondse omstandigheden is dus kleiner.

In dit geval is er uitgegaan van een totaal voorzieningsgebied van dit collectieve systeem van 200 ha met een jaarlijkse watervraag van 44.000 m³. De waterbeschikbaarheid bij 'evenredig verdelen' van 281.400 m³ is gelijk aan ca. 1/2^e tot 2/3^e van de gemiddelde afvoer bij Stuw Batterijweg (afhankelijk van de beschouwde periode, zie Paragraaf 5.1.2) en is dus een significant deel van het totale wegstromende water. Op basis van de ingeschatte terugwinefficiëntie is de minimale hoeveelheid die geïnfiltreerd moet worden om aan de watervraag te voldoen veel kleiner: ca. 80.000 m³ per jaar. Er zou dus ruim genoeg water beschikbaar moeten zijn om aan deze watervraag te voldoen. Op basis van de analyse in Paragraaf 5.2.3 lijken dergelijke hoeveelheden bij voldoende putcapaciteit en bovengronds buffervolume ook afvangbaar en infiltreerbaar. Naar schatting zouden hiervoor zo'n 3 verticale putten nodig zijn (Tabel 7-1).

Een grotere uitdaging bij een dergelijk collectief systeem is het transport vanuit de ondergrondse waterberging naar het areaal van de verschillende agrariërs. Om de kosten van het benodigde leidingwerk te drukken, is een goede locatiekeuze, centraal in het aangesloten gebied, van belang. Op deze locatie moet daarnaast dan ook voldoende oppervlaktewater (van voldoende kwaliteit) af te vangen zijn. Ook moeten er goede afspraken gemaakt worden over de benutting en verdeling van het opgeslagen zoet water tussen de verschillende agrariërs. Bij voorbaat kan niet met zekerheid worden gesteld hoeveel zoet water er teruggewonnen kan worden en dus beschikbaar is, waardoor er vooraf goed afspraken gemaakt moeten worden over het verdelingsvraagstuk bij schaarste. Hiervoor kan bijvoorbeeld gedacht worden aan het opzetten van een waterbank (zie bijv. Stofberg et al., 2021). Anderzijds is een groot voordeel van een collectief systeem dat de investeringskosten over meerdere agrariërs verdeeld worden en de kosten per agrariër vermoedelijk dus lager zijn.

7.3 Regionaal

In een regionaal systeem wordt één grote OWB opgezet om het gehele projectgebied (ca. 630 ha) te voorzien van zoet water. De grote schaal zorgt voor verdere optimalisering van de terugwinefficiëntie van het systeem, al is de toename ten opzichte van een collectief systeem naar verwachting relatief klein. Een voordeel van een regionaal systeem is dat het afvangen en infiltreren van het beschikbare water in het belang is van alle agrariërs in het gebied; er is geen concurrentie op het beschikbare zoete oppervlaktewater. Anderzijds zullen alle bedrijven een eerlijk deel van het beschikbare zoete water uit de ondergrond willen ontvangen. Aan deze kant moeten, meer nog dan bij een collectief systeem, aan de voorkant goede afspraken gemaakt worden over het verdelingsvraagstuk.

Naar schatting is er zeker 886.410 m³ wegstromend water beschikbaar voor infiltratie, verdeeld over de twee stuwen uit twee verschillende stroomgebieden, om in dit geval aan een watervraag van 138.600 m³ te voldoen. In principe is daarmee ruim voldoende water beschikbaar, de uitdaging hier is echter dit te kunnen afvangen en infiltreren. Allereerst is het praktischer om het water slechts op één punt, dus bij één van de twee stuwen, af te vangen. In dat geval is slechts de ca. de helft van het totale wegstromende water beschikbaar.

Op basis van een geschatte terugwinefficiëntie van 60% hoeft er echter maar 231.000 m³ te worden geïnfiltreerd om voldoende water te kunnen onttrekken (Tabel 7-1).

In Paragraaf 5.2.3 is het gebleken dat het niet zeker is dat dit volume ook echt geïnfiltreerd kan worden wanneer er water bij één stuw benut wordt. Hiervoor lijkt in ieder geval een hoge totale infiltratiecapaciteit en dus een grote hoeveelheid putten nodig, wat ook tot uitdagingen leidt bij de bovengrondse inpassing van het systeem in het gebied. Indien er wel meer dan in het gebied zelf nodig is geïnfiltreerd kan worden, zou er bij deze schaal mogelijk zelfs water beschikbaar kunnen zijn voor agrariërs buiten het gebied.

Bij een dergelijk regionaal systeem wordt het distribueren van het zoete water over de verschillende agrariërs een uitdaging. Om de grootste waterbeschikbaarheid te hebben, is afvangen en infiltreren van het water het meest logisch benedenstrooms in het gebied, bij (één van de) stuwen. Wanneer er watervraag is bij een agrariër ver van

de locatie van de ondergrondse waterberging, moet het water echter over grote afstanden worden vervoerd om alle agrariërs in het gebied te kunnen bereiken, tot wel enkele kilometers. Dit vergt een grote investering in leidingwerk. Ook wanneer water uit beide stroomgebieden op één punt geïnfiltreerd moet worden, zullen er over grote afstand leidingen aangelegd moeten worden.

Omdat alle agrariërs in het gebied bij zo'n regionaal systeem meedoen, kunnen investeringskosten wel over zo veel mogelijk partijen verdeeld worden. De vraag is of dit opweegt tegen de hogere investeringen die nodig zijn voor het bovengronds transport van het water ten opzichte van een meer lokaal (individueel of collectief) systeem.

7.4 Doorkijk naar pilotfase

Dit onderzoek heeft aangetoond dat het met OWB technisch gezien mogelijk is om in de watervraag van de agrariërs in het gebied te voorzien (bij het huidige landgebruik), wat een basis geeft om een volgende stap richting realisatie te maken. Desondanks bestaan er nog aanzienlijke onzekerheden ten aanzien van bijvoorbeeld de optimale systeemconfiguratie gegeven een bepaalde ondergrond, de daadwerkelijk realiseerbare terugwinefficiënties, en dus ook over de bijbehorende investerings- en operationele kosten. Deze onzekerheden vallen deels verder te reduceren door OWB in Wolphaartsdijk in de praktijk te gaan testen op pilot-schaal (individueel of collectief). Op die manier blijft de mogelijkheid open om bij verdere opschaling van het systeem optimalisaties toe te passen op basis van de ervaringen bij het pilotsysteem/de pilotsystemen, en hoe dit aansluit bij de watervraag van de agrariërs in het gebied. Hieronder worden alvast kort wat van de voornaamste stappen besproken die voor de ontwikkeling van een pilotsysteem gezet moeten worden.

7.4.1 Benodigde voorzuivering en vergunningen

De waterkwaliteitsanalyse in Hoofdstuk 4 heeft aangetoond dat direct gebruik van het oppervlakte en/of drainwater in het gebied voor infiltratie zowel uit milieu- als operationeel oogpunt niet mogelijk is. Voorzuivering om aan de technische eisen voor infiltratie te voldoen is goed mogelijk (zie Paragraaf 4.1.4), maar de mate van voorzuivering die nodig is om (1) vroegtijdige putverstopping te voorkomen en (2) aan de eisen van het vergunningsvoorschrift te voldoen is wel bepalend voor de kosten die hiermee gemoeid gaan.

De precieze vergunningseisen die voor infiltratie gesteld zullen worden aan de waterkwaliteit zijn echter nog onbekend omdat de wet- en regelgeving op dit gebied niet eenduidig is, maar juist ruimte biedt voor maatwerk en de afweging van de belangen (waterbeschikbaarheid versus waterkwaliteit). Afhankelijk van de gekozen schaal van toepassing kan het bevoegd gezag ook anders zijn: onder de 150.000 m³/jaar het waterschap en daarboven in principe de provincie. De vraag is dan ook niet alleen of een pilotproject vergund wordt maar vooral onder welke voorwaarden. Bijvoorbeeld: welke concentraties zijn laag genoeg en hoe frequent moet worden aangetoond worden dat de zuivering voldoende is? Het is daarom nuttig om over deze vragen in het begin van een vervolgproject in gesprek te gaan met de mogelijke bevoegde gezagen.

7.4.2 Putontwerp: verticaal (MPPW) vs. horizontaal (HDDW)

Uit dit onderzoek blijkt dat bij gebruik van een conventionele grondwaterput de terugwinefficiënties veel lager zullen zijn dan met 'onconventionele' putontwerpen. Zowel het gebruik van meerdere boven elkaar geplaatste verticale filters ('Multiple Partially Penetrating Wells', MPPW) als horizontale putten ('Horizontal Directionally Drilled Wells', HDDW) leveren een aanzienlijke verbetering op (Figuur 6-4). Daarnaast wijzen de modelsimulaties er ook op dat deze twee technieken op bepaalde aspecten net anders presteren. De verticale MPPW systemen lijken de eerste paar jaar gelijk wat beter te presteren en bij relatief kleine opslagvolumes, terwijl de horizontale putten mogelijk na enkele jaren en bij grotere opslagvolumes wat betere opslagrendementen leken op te leveren. Maar gezien de relatief kleine verschillen is het belangrijk te erkennen dat de gebruikte versimpelingen in de modelopzet, waarbij de MPPWs ook voor grotere volumes als 1 put gemodelleerd zijn en bij de HDDWs geen rekening is gehouden met extra verliezen aan de uiteinden, van invloed zijn geweest op de onderlinge resultaten.

Voor horizontale putten geldt ook dat deze techniek nog in ontwikkeling is, ondanks dat er al ruim twee decennia onderzoek wordt gedaan naar de toepassing van horizontaal geboorde putten voor grondwateronttrekking (Cirkel et al., 2006; Rambags et al., 2010; van der Schans et al., 2022). Zeker de ervaring met horizontale putten bij OWB projecten is vooralsnog beperkt tot het 'Freshmaker' project in Ovezande (K. G. Zuurbier et al., 2015) en het 'Zoete Toekomst' project op Texel (Merton et al., 2023). Bij beide projecten is gebleken dat de aanleg van dergelijke bronnen nog verbeterd moet worden, en dat deze bovendien nog aanzienlijk duurder is dan een verticale put. Ook de prestaties op de lange termijn moeten nog verder onderzocht worden, in termen van terugwinefficiënties maar vooral ook bij het voorkomen en verhelpen van putverstopping.

7.4.3 Invulling van zoetwaterbehoefte agrariërs

Naast de technische aspecten van een ondergrondse waterberging, is het in de pilotfase ook van belang om uit te zoeken in hoeverre het systeem aansluit bij de zoetwatervraag van agrariërs en welke ontwerpkeuzes gemaakt kunnen worden om deze aansluiting te bewerkstelligen. Enerzijds gaat dit over het verdelingsvraagstuk: wanneer meerdere agrariërs dezelfde OWB gebruiken, moeten er afspraken gemaakt worden over de verdeling van het water uit de OWB, zeker voor jaren waarin de OWB niet kan voldoen aan de totale watervraag van de aangesloten agrariërs. Een extra complicerende factor is hier het feit dat de hoeveelheid water die teruggewonnen kan worden uit de OWB altijd enige mate van onzekerheid blijft houden.

Anderzijds is het ook van belang dat de zoetwaterbehoefte van de agrariërs in het gebied nauwkeuriger in kaart gebracht wordt. In dit onderzoek is een eerste inschatting gedaan, waarbij is uitgegaan van een beregeningsbehoefte van 22 mm, op basis van 15% uien met een beregening van 80 mm/jaar en 25% aardappelen met een behoefte van 40 mm/jaar. In de praktijk is het echter mogelijk dat de zoetwatervraag sterk van deze aanname kan afwijken, door een andere verdeling van het landgebruik of een hoger uitvallende watervraag van de gewassen. Daarnaast is de aangenomen 22 mm/jaar een gemiddelde: in zeer natte jaren is er mogelijk geen enkele beregeningsbehoefte, terwijl in zeer droge jaren de beregeningsbehoefte ook een stuk hoger uit kan vallen. Dit bleek uit de rapportage van Stokkers et al. (2022), waar voor het droge jaar 2018 een beregeningsbehoefte op kleigrond voor uien werd gevonden van 80 mm (i.p.v. 48 mm gemiddeld over 2010-2019), voor pootaardappelen van 54 mm (i.p.v. 31 mm) en voor consumptieaardappelen van 101 mm (i.p.v. 49 mm). Een beregeningsbehoefte van 40 mm/jaar i.p.v. 22 mm/jaar over het areaal van een agrariër is dus in ieder geval in droge jaren niet ondenkbaar.

Wanneer de beregeningsbehoefte 40 mm/jaar i.p.v. 22 mm/jaar is, werkt dit door in de benodigde terugwinefficiëntie van de OWB die nodig is om aan de watervraag te voldoen, en daarmee ook de minimale hoeveelheid die geïnfiltreerd moet worden, zoals gedefinieerd aan het begin van dit hoofdstuk. Voor een individueel systeem voor een areaal van 40 ha zou dit bijvoorbeeld betekenen dat de watervraag 16.000 m³/jaar is i.p.v. 8.800 m³/jaar. Bij een terugwinefficiëntie van de OWB van 35% zal er dus minimaal 45.700 m³ geïnfiltreerd moeten worden om hieraan te kunnen voldoen. Bij benadering is dit slechts 10.000 m³ lager dan de geschatte waterbeschikbaarheid op basis van evenredig verdelen van het water (56.280 m³/jaar voor 40 ha). In principe is de waterbeschikbaarheid in dit scenario dus nog steeds voldoende, maar wanneer de waterbeschikbaarheid in droge jaren ook afneemt zou dit tot krapte kunnen leiden. Voor collectieve en regionale systemen speelt dit minder een rol, door de hogere terugwinefficiënties die hier verwacht worden. De hogere zoetwaterbehoefte zorgt er echter wel voor dat de minimaal benodigde hoeveelheid putten zal toenemen, en daarmee ook de investeringen die nodig zijn voor het opzetten van de OWB.

7.4.4 Locatiekeuze

Voor wat betreft de locatiekeuze van een eventuele pilot spelen verschillende, soms tegenstrijdige aspecten. De belangrijkste zijn hieronder samengevat:

- Geohydrologische geschiktheid: Bij het veldonderzoek is gebleken dat zowel de bodemopbouw als de waterkwaliteit door het gebied sterk verschilt. Vanuit dit oogpunt wordt er idealiter gekozen voor een locatie met zo min mogelijk storende kleilagen, en een zo laag mogelijk zoutgehalte. Qua zoutgehalte is gebleken dat deze centraal in de polders aanzienlijk lager is dan langs de randen (Figuur 4-4). De aanwezigheid van dunne kleilagen is grilliger en vertoont geen duidelijk ruimtelijk patroon (Figuur 3-4).
- Plek in polder: Qua distributie van het water naar de gekoppelde landbouwpercelen ligt een locatie centraal in de polders voor de hand, zodat er minder leidingwerk nodig is. Voor het afvangen van water ligt een locatie nabij de stuwen voor de hand, omdat de debieten hier het hoogst zijn.
- Eigendomssituatie: Uiteindelijk moet natuurlijk ook toestemming verkregen worden van een landeigenaar om de benodigde infrastructuur te installeren.

Gezien deze afwegingen lijkt een plek ten noorden van de stuwen meer richting het centrum van de polders voor de hand. Voor beide grote polders (Westkerkepolder en Westerlandpolder) zou dan een (pilot) OWB-systeem ontwikkeld kunnen worden, ten noorden van beide stuwen (Batterijweg en de Kulke).

8 Conclusies

Het grondwater onder de polders ten westen van Wolphaartsdijk is zeer zout, oplopend van 5 g/l net onder de Holocene deklaag op zo'n 12 meter diepte tot bijna zeewater (19 g/l) op ongeveer 45 meter diepte. De hoge zoutgehalten maken dat de omstandigheden voor ondergrondse waterberging (OWB) verre van ideaal zijn. Toch blijkt uit dit onderzoek, bestaande uit uitvoerig veldwerk en (modelmatige) berekeningen, dat het technisch mogelijk zou moeten zijn om met OWB te voorzien in de watervraag van de agrariërs in dit gebied, op schaalgroottes variërend van lokaal tot regionaal. De voornaamste redenen hiervoor zijn:

- De jaarlijkse hoeveelheid afstromend zoet water ($EGV < 2 \text{ mS/cm}$) in het winterhalfjaar is veel groter dan de geschatte watervraag op basis van het huidige landgebruik. Dat is gunstig voor de haalbaarheid van OWB omdat de vereiste terugwinefficiëntie daardoor laag is, mits voldoende water kan worden geïnfiltrerd.
- De watervoerende zandlagen zijn voldoende dik en doorlatend om water te kunnen infiltreren met redelijke infiltratiedebieten per put, waardoor de benodigde aantallen grondwaterputten om het afgevangen water de grond in te krijgen ook realistisch zijn.
- De terugwinefficiëntie kan sterk worden verbeterd door de toepassing van onconventionele putontwerpen: ofwel putten met meerdere boven elkaar geplaatste verticale filters ('Multiple Partially Penetrating Wells', MPPW) of horizontaal geboorde putten ('Horizontal Directionally Drilled Wells', HDDW). Hierdoor zijn de geschatte terugwinefficiënties voor alle gesimuleerde varianten voldoende om in de benodigde watervraag te voorzien, met uitzondering van de eerste paar cycli (jaar) voor de meest ongunstige doorgerekende geohydrologische omstandigheden.

Dat het technisch gezien mogelijk lijkt, wil niet zeggen dat OWB hier ook praktisch uitvoerbaar en doelmatig is. In dat opzicht volgen uit het onderzoek nog wel aanzienlijke onzekerheden die uiteindelijk bepalen of de benodigde inspanning en de kosten voor het opslaan en terugwinnen van het water in proportie staan tot de meerwaarde van grotere waterbeschikbaarheid en droogtebestendigheid. Alhoewel de uitkomsten van dit onderzoek ook in dit opzicht hoopgevend zijn, is dit reden om in een volgende stap te starten met een of twee OWB-systemen op kleine/middelgrote schaal, zodat de resterende onzekerheden verder kunnen worden onderzocht en zo efficiënt mogelijk verder gewerkt kan worden naar een systeem van regionale watervoorziening met OWB. De belangrijkste aandachtspunten die in een volgende fase verder onderzocht dienen te worden zijn:

- Het optimale putontwerp. Zowel met MPPW als HDDW putten kunnen voldoende hoge terugwinefficiënties behaald worden om in de watervraag te voorzien. De modelsimulaties geven aan dat de prestaties van deze technieken door verschillende aspecten beïnvloedt worden en dat MPPW putten in het algemeen de eerste paar jaar hogere terugwinefficiënties behalen maar dat horizontale putten mogelijk hogere terugwinefficiënties geven op de langere termijn. Deels kunnen deze verschillen wellicht ook verklaard kan worden door versimpelingen in de modelopzet. Ten opzichte van MPPW putten is de beperkte ervaring met HDDW putten voor OWB-systemen in de praktijk nog een aandachtspunt, met name wat betreft de verstoppingsgevoeligheid van dit type putten en de daadwerkelijk te realiseren terugwinefficiënties. Idealiter zou de OWB toepassing van zowel MPPW als HDDW op voor deze technieken relatief gunstige condities in de volgende fase onderzocht worden.
- De mate van voorzuivering die nodig is. Uit het onderzoek is gebleken dat het water te hoge concentraties bestrijdingsmiddelen bevat die een bepaalde mate van voorzuivering zullen vereisen voor infiltratie. Vanuit operationeel oogpunt bevat met name het oppervlaktewater maar ook het drainwater daarnaast te hoge concentraties zwevende stof en potentie voor biologische groei wat tot snelle putverstopping kan leiden. Ook

hiervoor zal daardoor een flinke voorzuivering nodig zijn. Alhoewel dit technisch gezien goed mogelijk is zal de mate van voorzuivering geoptimaliseerd moeten worden om aan de operationele- en vergunningseisen te voldoen zonder dat de investerings- en operationele kosten te hoog oplopen.

- Het afvangen en infiltreren van voldoende water. Doordat het geschatte volume jaarlijks uit het gebied afstromend water aanzienlijk groter is dan de geschatte watervraag (~6,5 keer) is er in theorie ruim voldoende water beschikbaar voor infiltratie. Zeker wanneer gestart wordt met een systeem op kleine schaal zal waterbeschikbaarheid dus geen probleem zijn. Uit berekeningen in dit onderzoek blijkt echter dat het niet realistisch is dat 100% van het afstromend water afgevangen en geïnfilteerd kan worden, tenzij er een zeer hoge infiltratiecapaciteit (veel putten) en een grote bovengrondse buffercapaciteit gerealiseerd wordt. Daarnaast is gebleken dat de hoeveelheid afstromend water van jaar tot jaar sterk varieert, en er dus ook jaren kunnen zijn met een zeer lage waterbeschikbaarheid en een beperkte aanvulling van het systeem. Voor de pilot zal onderzocht moeten worden welk deel van het afstromend daadwerkelijk afgevangen kan worden, hoe dit bij verdere opschaling kan worden geoptimaliseerd, en hoe met de verdeling van het water bij schaarste omgegaan wordt.

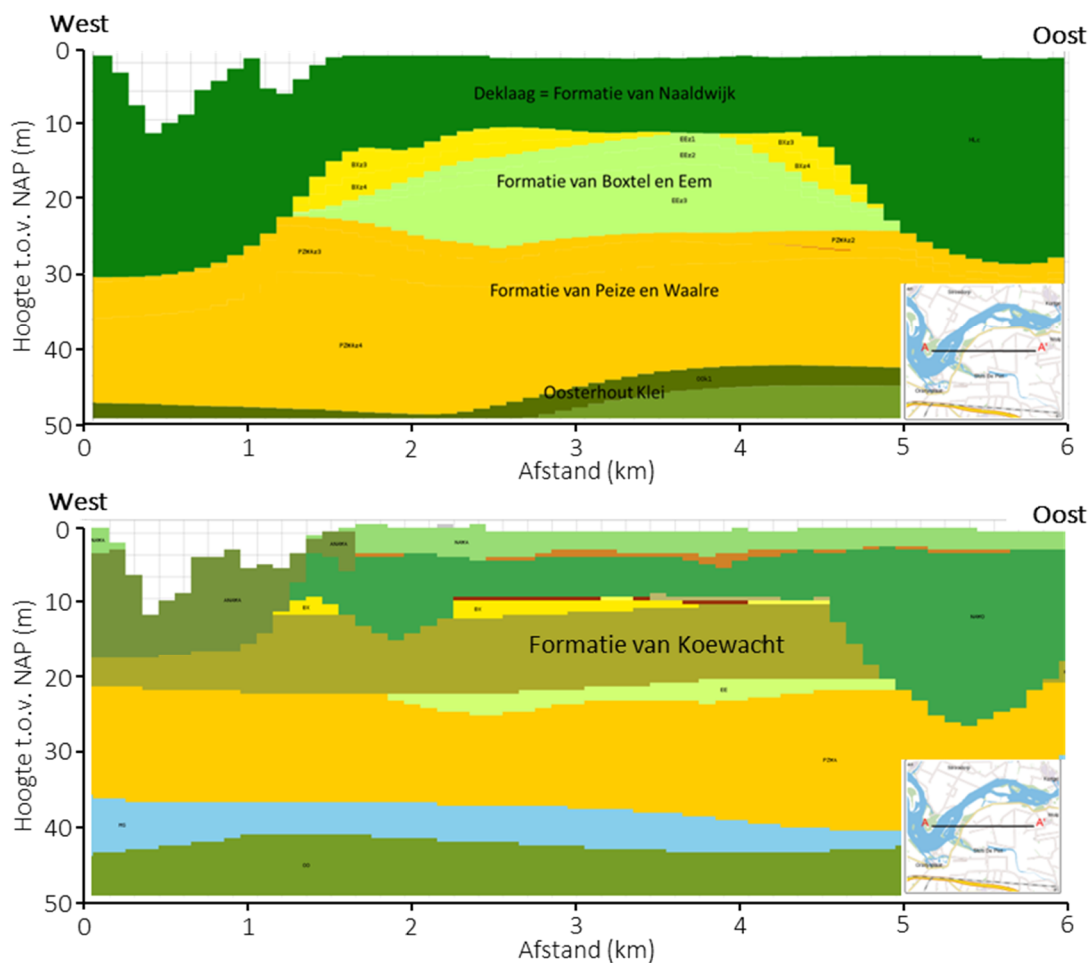
Referentielijst

- Bakker, M., Post, V., Langevin, C. D., Hughes, J. D., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. *Groundwater*. <https://doi.org/10.1111/gwat.12413>
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier, New York, USA.
- Beernink, S., & van der Schans, M. (2023). *PCD 13-5. Putten en puttenvelden ten behoeve van drinkwater. Deel 5: Infiltratieputten* (Issue november). www.kwrwater.nl
- Beernink, S., Bloemendal, M., Kleinlugtenbelt, R., & Hartog, N. (2022). Maximizing the use of aquifer thermal energy storage systems in urban areas: effects on individual system primary energy use and overall GHG emissions. *Applied Energy*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118587>
- Beernink, S., Hartog, N., Vardon, P. J., & Bloemendal, M. (2024). Geothermics Heat losses in ATEs systems: The impact of processes, storage geometry and temperature. *Geothermics*, 117(102889). <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102889>
- Berbee, B. M., Van Goor, G. R. P., & Martac, E. (2017). Doorlatendheidsonderzoek met de HPT-sondering en MPT Mini-Pompproeven. Vergelijking van de Hydraulic Profiling Tool en Mini-Pompproef met traditionele meetmethoden. *Geotechniek*, 24–29. <https://www.vakbladgeotechniek.nl/magazines/2017-03/2017-03-P24-Berbee.pdf>
- Berbee, B. M., Van Goor, G. R. P., & Martac, E. (2017). Doorlatendheidsonderzoek met de HPT-sondering en MPT Mini-Pompproeven. Vergelijking van de Hydraulic Profiling Tool en Mini-Pompproef met traditionele meetmethoden. *Geotechniek*, 24–29. <https://www.vakbladgeotechniek.nl/magazines/2017-03/2017-03-P24-Berbee.pdf>
- Brandsma, T. (2014). *Comparison of automatic and manual precipitation networks in the Netherlands*. KNMI. Technical report; TR-347. <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/publicatie/comparison-of-automatic-and-manual-precipitation-networks-in-the-netherlands-5a32f956-bddc-48cf-ba4a-d6e6bd74b972>
- Brown, C. J. (2005). *Planning Decision Framework for Brackish Water Aquifer, Storage and Recovery (ASR) Projects* [PhD thesis]. University of Florida.
- Cirkel, G., Pittens, B., & Kooiman, J. W. (2006). *KWR 06.065 | Haalbaarheid Horizontal Directional Drilled Wells HDDW* (Issue November).
- De Louw, P. G. B. (2013). Saline seepage in deltaic areas. Preferential groundwater discharge through boils and interactions between thin rainwater lenses and upward saline seepage. [Vrije Universiteit Amsterdam]. <https://publicwiki.deltares.nl/display/ZOETZOUT/Promotie+Perry+de+Louw>
- De Louw, P. G. B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B. R., Gunnink, J., Van Baaren, E. S., & Oude Essink, G. H. P. (2011). Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 3659–3678. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3659-2011>
- De Louw, P. G. B., Eeman, S., Oude Essink, G. H. P., Vermue, E., & Post, V. E. A. (2013). Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. *Journal of Hydrology*, 501, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.026>
- Duijff, R., Bloemendal, M., & Bakker, M. (2021). Interaction effects between aquifer thermal energy storage systems. *Groundwater*, 1–10. <https://doi.org/10.1111/gwat.13163>
- Hannewijk, N. (2024). *Monitoring van drainage- en oppervlaktewater kwaliteit voor infiltratie in Zeeland* [Stageverslag]. HZ University of Applied Sciences.
- KNMI. (2023). KNMI'23 klimaatscenario's voor Nederland. <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-23-klimaatscenario-s>
- Langevin, C. D. (2008). Modeling axisymmetric flow and transport. *Ground Water*, 46(4), 579–590. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00445.x>
- Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., & Provost, A. M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. In Book 6,

- Modeling Techniques. Techniques and Methods 6–A55, USGS.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3133/tm6A55>
- Langevin, C. D., Panday, S., & Provost, A. M. (2019). Hydraulic-Head Formulation for Density-Dependent Flow and Transport. *Groundwater*, 58(3), 349–362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gwat.12967>
- Merton, H., Velstra, J., Noordegraaf, I., & Te Winkel, T. (2023). Zoete Toekomst Texel – voortgangsrapportage 2023. <https://www.zoetetoekomsttexel.nl/resultaten>
- Missimer, T. M., Guo, W., Walker, C. W., & Maliva, R. G. (2002). Hydraulic and density considerations in the design of aquifer storage and recovery systems. *Florida Water Resources Journal*, February, 30–36.
- Olsthoorn, T. (1982). *KIWA Mededeling no. 71 | Verstopping van persputten*.
- Oude Essink, G., de Louw, P., Stevens, B., Prevo, C., Marconi, V., & Goes, B. (2009). *TNO-rapport 2007-U-R0925/A | Voorkomen en dynamiek van regenwaterlenzen in de Provincie Zeeland - resultaten van een verkennende en provinciedekkende meetcampagne*.
- Oude Essink, G. H. P., Van Baaren, E. S., Zuurbier, K. G., Velstra, J., Veraart, J. A., Brouwer, W., Faneca Sánchez, M., Pauw, P. S., De Louw, P. G. B., Vreke, J., & Schoevers, M. (2014). *GO-FRESH: Valorisatie kansrijke oplossingen voor een robuuste zoetwatervoorziening*. 84.
- Pauw, P. S., van Baaren, E. S., Visser, M., de Louw, P. G. B., & Oude Essink, G. H. P. (2015). Increasing a freshwater lens below a creek ridge using a controlled artificial recharge and drainage system: a case study in the Netherlands. *Hydrogeology Journal*, 23(7), 1415–1430. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1264-z>
- Pippi, M., Vink, R., Haasnoot, J., & Bersan, S. (2022). Automated CPT interpretation with a Convolutional Neural Network. *Cone Penetration Testing 2022 - Proceedings of the 5th International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT 2022*, 646–650. <https://doi.org/10.1201/9781003308829-94>
- Post, V. E. A., Kooi, H., & Simmons, C. T. (2007). Using hydraulic head measurements in variable-density ground water flow analyses. *Ground Water*, 45(6), 664–671. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00339.x>
- Provincie Zeeland. (2013). *Het ontstaan van Zeeland*.
- Rambags, F., Cirkel, G., van der Hoeven, I., & Rothuizen, R. (2010). *BTO 2010.028 | HDDW testwinning Nieuwegein - Proefboring naar de geschiktheid van horizontaal gestuurd boren voor de aanleg van drinkwaterputten*.
- Ros, S. E. M., & Zuurbier, K. G. (2017). The impact of integrated aquifer storage and recovery and brackish water reverse osmosis (ASRRO) on a coastal groundwater system. *Water*, 9(273).
<https://doi.org/10.3390/w9040273>
- Schout, G. (2020). *Origin, fate and detection of methane leaking from the deep subsurface into groundwater and soil*.
- Stafleu, J., Maljers, D., Busschers, F. S., Gunnink, J. L., Schokker, J., Dambrink, R. M., Hummelman, H. J., & Schijf, M. L. (2013). GeoTop modellering.
- Stofberg, S., Ros, S., Raat, K., Klooster, J., Ruepert, N., Agerbeek, B., Delsman, J. R., Bootsma, H., Op den Kelder, T., & Van de Veen, B. (2021). Waterbank Westland; Droge voeten, voldoende gietwater. KWR 2021.062.
<https://library.kwrwater.nl/publication/67118255/>
- Stokkers, R., Jager, J., & Van Asseldonk, M. A. P. M. (2022). *Berekening in de Nederlandse landbouw op gewas- en regioniveau in de periode 2010-2019*. Wageningen Economic Research. Rapport 2022-011
<https://research.wur.nl/en/publications/berekening-in-de-nederlandse-landbouw-op-gewas-en-regioniveau-in->
- Stuyfzand, P. J., Nienhuis, P., Antoniou, A., & Zuurbier, K. (2012). *Haalbaarheid van ondergrondse berging via A (S / T) R in Hollands kustduinen* (Issue October).
- Stuyt, L. C. P. M., Blom-Zandstra, M., & Kselik, R. A. L. (2016). Inventarisatie en analyse zouttolerantie van landbouwgewassen op basis van bestaande gegevens. Wageningen Environmental Research, Rapport 2739, ISSN1566-7197. <https://edepot.wur.nl/391931>
- Thiem, A. (1870). Die Ergiebigkeit artesischer Bohrlocher, Schachtbrunnen und Filtergallerien. *Journal Für Gasbeleuchtung Und Wasserversorgung*.
- TNO. (2023). *GeoTOP v1.5: nieuwe versie van Zeeland en Goeree-Overflakkee*.
<https://www.dinoloket.nl/nieuws/geotop-v15-nieuwe-versie-van-zeeland-en-goeree-overflakkee>
- TNO. (2024). *DINOloket*. <https://www.dinoloket.nl/>

- van der Schans, M., Hilbrandie, R., & Cirkel, G. (2022). *KWR 2022.116 | Aanleg en testen van Horizontal Directional Drilled Well (HDDW) Dunea* (Issue November).
- van der Schans, M., & Meerkerk, M. (2019). *KWR PCD 13-2. Putten en puttenvelden ten behoeve van drinkwater. Deel 2: Ontwerp* (Issue november).
- van Driezum, I., Van der Grift, B., Cirkel, G., & Pronk, T. (2024). *BTO 2024.047 | Verkenning van oppervlaktewaterkwaliteit in relatie tot risico's voor grondwater bij grootschalige infiltratie*. [https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/DELTAFACTS/Deltafacts NL Waterkwaliteit PDF/Kunstmatige infiltratie v2%2C mei 2022-converted.pdf](https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/DELTAFACTS/Deltafacts%20NL%20Waterkwaliteit%20PDF/Kunstmatige%20infiltratie%20v2%2C%20mei%202022-converted.pdf)
- Van Leer, M. D., Zaadnoordijk, W. J., Zech, A., Buma, J., Harting, R., Bierkens, M. F. P., & Griffioen, J. (2023). Dominant factors determining the hydraulic conductivity of sedimentary aquitards: A random forest approach. *Journal of Hydrology*, 627. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130468>
- Vernes, R. W., & van Doorn, T. H. M. (2005). *Van Gidslaag naar Hydrogeologische Eenheid – Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II*. TNO Report, Netherlands Inst. of Applied Geoscience TNO, Utrecht, the Netherlands.
- Zech, A., Attinger, S., Bellin, A., Cvetkovic, V., Dietrich, P., Fiori, A., Teutsch, G., & Dagan, G. (2019). A Critical Analysis of Transverse Dispersivity Field Data. *Groundwater*, 57(4), 632–639. <https://doi.org/10.1111/gwat.12838>
- Zuurbier, K. G., Bakker, M., Zaadnoordijk, W. J., & Stuyfzand, P. J. (2013). Identification of potential sites for aquifer storage and recovery (ASR) in coastal areas using ASR performance estimation methods. *Hydrogeology Journal*, 21(6), 1373–1383. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1003-2>
- Zuurbier, K. G., Zaadnoordijk, W. J., & Stuyfzand, P. J. (2014). How multiple partially penetrating wells improve the freshwater recovery of coastal aquifer storage and recovery (ASR) systems: A field and modeling study. *Journal of Hydrology*, 509, 430–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.057>
- Zuurbier, K. G., Kooiman, J. W., Groen, M. M. A., Maas, B., & Stuyfzand, P. J. (2015). Enabling Successful Aquifer Storage and Recovery of Freshwater Using Horizontal Directional Drilled Wells in Coastal Aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(3), 1–7. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000990](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000990)
- Zuurbier, K. G. (2016). *Increasing Freshwater Recovery Upon Aquifer Storage* [PhD thesis, Vrije Universiteit Amsterdam]. http://www.subsol.org/uploads/deliverables/LR-Thesis_KoenZuurbier.pdf
- Zuurbier, K. G., Hartog, N., & Stuyfzand, P. J. (2016). Reactive transport impacts on recovered freshwater quality during multiple partially penetrating wells (MPPW-)ASR in a brackish heterogeneous aquifer. *Applied Geochemistry*, 71, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.05.013>
- Zuurbier, K. G., Ros, S. E. M., & Stuyfzand, P. J. (2018a). Verkenning inzet ASR voor opslag drinkwater PS Hoorn.
- Zuurbier, K. G., Van Dooren, T. C. G. W., & Ros, S. E. M. (2018b). Resultaten Freshmaker (2013-2017).
- Zuurbier, K., Van Dooren, T., & Ros, S. (2018c). Improved Freshmaker reference site in Ovezande, the Netherlands (TRL8). SubSol. KWR Watercycle Research Institute. <https://library.kwrwater.nl/publication/56187792/>
- Zuurbier, K. G., & Van Dooren, T. C. G. W. (2019). *Urban Waterbuffer Spangen: Resultaten*. KWR 2019.111. <https://library.kwrwater.nl/publication/60494440/>

Bijlage I: Vergelijking stratigrafie REGISII en GeoTOP



Stratigraphische doorsneden van West – Oost naar oost door het projectgebied, met boven de interpretatie door het REGIS II model en onder door de nieuwe versie van het GeoTOP model.

Bijlage II: Boorstaten

-

Boorstaat

-

NITG-Boornummer	B48E1946	Coördinatenstelsel	Rijksdriehoeksmeting
X-coördinaat	41492	Bepaling lokatie	GPS (Global Positioning System)
Y-coördinaat	393484	Beschrijvingsmethode	Onbekend
Maaiveld (m tov NAP)	3.00	Vertrouwelijkheid	Openbaar
Datum boring	19-05-2023	Werknummer	B1 Meerkoetweg
Plaatsnaam	Wophaartsdijk-Meerkoetweg		MEERKOETB1
Provincie	Zeeland		
Kaartblad	48E		
Soort boring	Matig diepe boring derden		
Einddiepte (m)	52.00		
Uitvoerder	Schijf Grondboringen		
Boormethode	Zuigboring		
Opmerkingen	Originele XY 51.518891 / 3.751727; Maaiveld o.b.v. AHN4 DSM.		

Lithologie

Beschrijver lagen	M. Schijf
Organisatie beschrijver	Schijf Grondboringen
Nat/droog	Onbekend

Stratigrafie 2003

Beschrijver stratigrafie	Menkovic, A.
Organisatie beschrijver	Geologische Dienst Nederland
Datum stratigrafie	10-10-2023
Versie stratigrafie	1

Laagbeschrijving

Boven	Onder	Grondsoort	Omschrijving	M63	LU	SI	ZA	GR	OR	CA
0.00	0.10	planten	Opm.: Gras							
0.10	0.50	klei	zwak zandig, sterk humeus, bruin							
0.50	1.00	klei	matig zandig, zwak humeus, bruin							
1.00	2.00	klei	zwak zandig, zwak humeus, bruin							
2.00	3.50	klei	bruin, zandlagen							
3.50	4.50	klei	siltig, zwak zandig, grijs-zwart, Opm.: Slibhoudend vertaald als siltig							
4.50	6.00	klei	siltig, zwak zandig, grijs-zwart, Opm.: Licht slibhoudend vertaald als siltig							
6.00	7.50	zand	grijs, Zand: matig fijn, Opm.: Zandmediaan 150-212mu.	180						
7.50	8.00	zand	grijs, Zand: fijne categorie (O), Schelpen: schelpen, schelpresten, kleilagen							
8.00	10.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
10.00	12.00	zand	grijs, Zand: matig fijn, Opm.: Zandmediaan 150-212mu.	180						
12.00	13.00	zand	grijs, Zand: matig fijn, Opm.: Zandmediaan 150-212mu.	180						
13.00	14.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
14.00	15.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
15.00	16.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
16.00	17.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
17.00	18.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
18.00	19.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn; kleiresten vertaald als kleibrokjes.	212						
19.00	20.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
20.00	21.50	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
21.50	22.00	zand	grijs, Zand: matig fijn, Schelpen: veel schelpen, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn, zandmediaan 150-212mu.	180						
22.00	23.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig tot matig fijn.	212						
23.00	24.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Organisch materiaal: hout, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
24.00	24.50	zand	grijs, Zand: zeer grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
24.50	26.00	klei	zwak zandig, zwak humeus, grijs							
26.00	28.00	klei	grijs, zandlagen							

Boven	Onder	Grondsoort	Omschrijving	M63	LU	SI	ZA	GR	OR	CA
28.00	29.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleilagen, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
29.00	30.00	zand	grijs, Zand: matig grof, veel kleilagen, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
30.00	31.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
31.00	32.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
32.00	33.00	zand	grijs, Zand: matig grof, spoor kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
33.00	34.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
34.00	35.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
35.00	36.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
36.00	37.00	zand	grijs, Zand: matig grof, spoor kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
37.00	38.00	zand	grijs, Zand: matig grof, spoor kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
38.00	39.50	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
39.50	41.00	klei	zwak zandig, grijs							
41.00	42.25	klei	zwak zandig, grijs, zandlagen							
42.25	44.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als fijn.	212						
44.00	45.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: veel schelpen, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
45.00	46.00	schelpen	zandig, grijs-wit, Zand: zeer grof, kleibrokjes, zandlagen, Opm.: Zandmediaan 300-425mu.	360						
46.00	47.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpgruis, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
47.00	48.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpgruis, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
48.00	49.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpgruis, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
49.00	50.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpgruis, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
50.00	51.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpgruis, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn; zandmediaan 212-300mu..	260						
51.00	52.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpgruis, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						

Stratigrafie 2003

Boven	Onder	S	AS	LF	ST	Omschrijving
0.00	2.00	AAOP				Antropogeen, opgebrachte grond
2.00	19.00	NAWA				Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren
19.00	34.00	NN				Niet formeel ingedeelde afzettingen of onbekend, Opm.(intern): Waarschijnlijk Eem en Waalre, maar niet te onderscheiden door slechte kwaliteit beschrijving en monsters.
34.00	52.00	OO				Formatie van Oosterhout

-

Boorstaat

-

NITG-Boornummer	B48E1945	Coördinatenstelsel	Rijksdriehoeksmeting
X-coördinaat	41751	Bepaling lokatie	GPS (Global Positioning System)
Y-coördinaat	394691	Beschrijvingsmethode	Onbekend
Maaiveld (m tov NAP)	0.60	Vertrouwelijkheid	Openbaar
Datum boring	16-05-2023	Werknummer	B2 Batterijweg
Plaatsnaam	Wophaartsdijk-Batterijweg		BATTERIJB2
Provincie	Zeeland		
Kaartblad	48E		
Soort boring	Matig diepe boring derden		
Einddiepte (m)	52.00		
Uitvoerder	Schijf Grondboringen		
Boormethode	Zuigboring		
Opmerkingen	Originele XY 51.529791 / 3.755072; Maaiveld o.b.v. AHN4 DSM.		

Lithologie

Beschrijver lagen	M. Schijf
Organisatie beschrijver	Schijf Grondboringen
Nat/droog	Onbekend

Stratigrafie 2003

Beschrijver stratigrafie	Menkovic, A.
Organisatie beschrijver	Geologische Dienst Nederland
Datum stratigrafie	10-10-2023
Versie stratigrafie	1

Laagbeschrijving

Boven	Onder	Grondsoort	Omschrijving	M63	LU	SI	ZA	GR	OR	CA
0.00	0.10	baksteen	Opm.: Klinkers							
0.10	0.50	puin								
0.50	1.00	klei	sterk zandig, grijs							
1.00	2.00	zand	grijs, Zand: fijne categorie (O), Schelpen: schelpen, schelpresten, kleilagen							
2.00	2.50	klei	zwak zandig, matig humeus, grijs							
2.50	3.25	veen	bruin							
3.25	4.00	klei	zwak zandig, grijs							
4.00	6.00	leem	zwak zandig, grijs							
6.00	7.00	klei	zwak zandig, zwak humeus, grijs							
7.00	8.00	klei	zwak zandig, grijs							
8.00	10.00	zand	grijs, Zand: zeer fijn, Schelpen: schelpen, schelpresten, kleilagen							
10.00	11.25	klei	zwak zandig, grijs, Schelpen: schelpen, schelpresten							
11.25	12.00	klei	grijs, zandlagen							
12.00	14.50	zand	grijs, Zand: matig grof, zandlagen, Opm.: Zand beschreven als fijn.	212						
14.50	16.00	klei	zwak zandig, grijs							
16.00	17.50	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
17.50	18.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
18.00	20.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn; kleibrokjes op 18.50m.	212						
20.00	21.00	klei	grijs							
21.00	21.75	klei	zwak zandig, grijs							
21.75	22.50	zand	grijs, Zand: matig fijn, Opm.: Zand beschreven als fijn.	150						
22.50	24.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
24.00	25.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: spoor schelpen, spoor schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
25.00	26.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: spoor schelpen, spoor schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn; zandmediaan 212-300mu.	260						
26.00	27.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot matig grof.	300						
27.00	28.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot matig grof.	300						
28.00	29.25	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot matig grof.	212						
29.25	30.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						

Boven	Onder	Grondsoort	Omschrijving	M63	LU	SI	ZA	GR	OR	CA
30.00	31.50	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	212						
31.50	32.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleilagen, Opm.: Zand beschreven als fijn.	212						
32.00	34.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
34.00	35.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
35.00	36.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
36.00	36.50	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn; kleibrokjes beschreven als kleisnippers.	212						
36.50	38.00	zand	grijs, Zand: fijne categorie (O), veel kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als fijn.							
38.00	39.00	zand	grijs, Zand: fijne categorie (O), kleilagen, Opm.: Zand beschreven als fijn.							
39.00	40.00	klei	grijs, zandlagen							
40.00	42.00	zand	grijs, Zand: matig grof, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn; kleibrokjes beschreven als kleisnippers.	212						
42.00	43.00	zand	grijs, Zand: matig grof, spoor kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
43.00	44.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Opm.: Zand beschreven als fijn tot matig fijn.	212						
44.00	45.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpen, schelpresten, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
45.00	46.50	zand	grijs, Zand: matig grof, spoor kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						
46.50	48.00	schelpen	grijs-wit, kleibrokjes, zandlagen							
48.00	49.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpgruis, Opm.: Zand beschreven als matig fijn.	300						
49.00	50.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpgruis, kleibrokjes, Opm.: Zand beschreven als matig fijn; kleibrokjes beschreven als kleisnippers.	300						
50.00	51.00	zand	grijs, Zand: zeer grof, Schelpen: schelpgruis, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	300						
51.00	52.00	zand	grijs, Zand: matig grof, Schelpen: schelpgruis, Opm.: Zand beschreven als matig fijn tot fijn.	212						

Stratigrafie 2003

Boven	Onder	S	AS	LF	ST	Omschrijving
0.00	0.50	AAOP				Antropogeen, opgebrachte grond
0.50	1.00	NAWA				Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Walcheren
1.00	2.50	NIHO				Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket, Opm.(intern): Het monster is veen, beschrijving sluit niet aan.
2.50	3.25	NIHO				Formatie van Nieuwkoop, Hollandveen Laagpakket
3.25	16.00	NAWO				Formatie van Naaldwijk, Laagpakket van Wormer
16.00	20.00	KW				Formatie van Koewacht
20.00	28.00	EE				Eem Formatie
28.00	39.00	WA				Formatie van Waalre, Opm.(intern): Onderscheiden vooral o.b.v. ontbreken schelpen en enig kleuronderscheid in mosnters.
39.00	52.00	OO				Formatie van Oosterhout

Schijf Grondboringen B.V.

	Formulier	Doc.code:	OPR
	Opleverrapportage	Pagina:	1 / 4
		Datum:	22-12-10
		Versie:	2.0



Drechtdijk 36, 1424 RH De Kwakel
Tel: 0297-563260, Fax: 0297-540592

BOORPROFIEL (uitgevoerd onafhankelijk van de opdrachtgever en onder BRL SIKB 2100, VKB pr

Plaats	Wolphaarsdijk	BORING 02!	
Locatie	Batterijweg 1		
Uitvoeringsperiode			16-5-2023
Boringnummer/code	B1/proefboring		
Boorsyst./diam.	Zuigboring/240		
Opdrachtgever	KWR-Water		
Boormeester	M Schijf		
Einddiepte	52.00		
Hulp-boormeester	M Elings		
Boorspoeling / additieven		Hoeveelheid werkwater	7m ³
XY-coördinaten	51.529791 3.755072		

Diepte in mtrs - maaiveld	Omschrijving grondlagen vlgs NEN 5104	M-waarde
00.00 - 00.10	klinkers	
00.10 - 00.50	puin	
00.50 - 01.00	klei,sterk zandig,grijs	
01.00 - 02.00	zand,fijn met kleilaagjes en schelpresten,grijs	
02.00 - 02.50	klei,licht zandig matig humeus,grijs	
02.50 - 03.25	veen,bruin	
03.25 - 04.00	klei,licht zandig,grijs	
04.00 - 06.00	klei,,licht zandig,grijs	
06.00 - 07.00	klei,licht zandif,licht humeus,grijs	
07.00 - 08.00	klei,licht zandig,grijs	
08.00 - 10.00	zand,zeer fijn met schelpresten en kleilaagjes,grijs	
10.00 - 11.25	klei,licht zandig met schelpresten,grijs	
11.25 - 12.00	klei met zandlagen,grijs	
12.00 - 14.50	zand,fijn me zandlagen,grijs	212
14.50 - 16.00	klei,licht zandig,grijs	
16.00 - 17.50	zand,fijn tot matig fijn,grijs	212
17.50 - 18.00	zand,matig fijn met schelpresten,grijs	300
18.00 - 20.00	zand,matig fijn op 18,50 kleibrokjes,grijs	212
20.00 - 21.00	klei,grijs	
21.00 - 21.75	klei,licht zandig,grijs	
21.75 - 22.50	zand,fijn,grijs	150
22.50 - 24.00	zand,matig fijn,grijs	212
24.00 - 25.00	zand,matig fijn wat schelpresten,grijs	212
25.00 - 26.00	zand,matig fijn wat schelpresten,grijs	212/300
26.00 - 27.00	zand,matig fijn tot matig grof,grijs	300



Schijf Grondboringen B.V.

	Formulier	Doc.code:	OPR
	Opleverrapportage	Pagina:	4 / 4
		Datum:	16-07-10
		Versie:	1.0

Plaats	Wolphaarsdijk		
Locatie	Batterijweg 1		
Uitvoeringsperiode	16-5-2023		
Boringnummer/code	B1/proefboring		
Boorsyst./diam.	Zuigboring/240		
Opdrachtgever	KWR-Water		
Boormeester	M Schijf		
Einddiepte	52.00		
Hulp-boormeester	M Elings		
Boorspoeling / additieven	0	Hoeveelheid werkwater	7m³
XY-coördinaten	51.529791 3.755072		

Kleiafdichting		
kleiafdichting 00	00.30-02.50	
grind 1-1.6	02.50-05.50	
kleiafdichting 00	05.50-07.00	
grind 1-1.6	07.00-12.50	
kleiafdichting 300	12.50-16.50	
grind 1-1.6	16.50-19.00	
kleiafdichting 00	19.00-22.50	
grind 1-1.6	22.50-27.00	
kleiafdichting 00	27.00-28.00	
grind 1-1.6	28.00-38.00	
kleiafdichting 300	38.00-41.00	
grind 1-1.6	41.00-46.10	
kleiafdichting 00	46.10-46.50	
grind 1-1.6	46.50-52.00	

Grondwaterinformatie				
m-mv	0,82	1	PH / EC	12,35
m-mv	0,87	2	PH / EC	18,7
m-mv	0,95	3	PH / EC	20+ ???
m-mv			PH / EC	
m-mv			PH / EC	

Schijf Grondboringen B.V.

	Formulier	Doc.code:	OPR
	Opleverrapportage	Pagina:	1 / 4
		Datum:	22-12-10
		Versie:	2.0



Drechtdijk 36, 1424 RH De Kwakel
Tel: 0297-563260, Fax: 0297-540592

BOORPROFIEL (uitgevoerd onafhankelijk van de opdrachtgever en onder BRL SIKB 2100, VKB pro

Plaats	Wolphaarsdijk	BORING 01!	
Locatie	Meerkoetweg		
Uitvoeringsperiode			19-5-2023
Boringnummer/code	B2/proefboring		
Boorsyst./diam.	Zuigboring/240		
Opdrachtgever	KWR-Water		
Boormeester	M Schijf		
Einddiepte	52.00		
Hulp-boormeester	M Elings		
Boorspoeling / additieven		Hoeveelheid werkwater	7m ³
XY-coördinaten	51.518891 3.751727		

Diepte in mtrs - maaiveld	Omschrijving grondlagen vlgns NEN 5104	M-waarde
00.00 - 00.10	gras	
00.10 - 00.50	klei,sterk humeus,licht zandig,bruin	
00.50 - 01.00	klei,matig zandig,licht humeus,bruin	
01.00 - 02.00	klei,licht zandig,licht humeus,bruin	
02.00 - 03.50	klei met zandlagen,bruin	
03.50 - 04.50	klei,licht zandig,slibhoudend,grijs/zwart	
04.50 - 06.00	klei,licht zandig,licht slibhoudend,grijs/zwart	
06.00 - 07.50	zand,fijn tot matig fijn,grijs	150/212
07.50 - 08.00	zand,fijn met kleilaagjes en schelpresten,grijs	
08.00 - 10.00	zand,matig fijn tot fijn,grijs	212
10.00 - 12.00	zand,matig fijn tot fijn,grijs	150/212
12.00 - 13.00	zand,matig fijn tot fijn,grijs	150/212
13.00 - 14.00	zand,matig fijn tot fijn,grijs	212
14.00 - 15.00	zand,matig fijn met schelpresten,grijs	212
15.00 - 16.00	zand,matig fijn met schelpresten,grijs	212
16.00 - 17.00	zand,matig fijn met schelpresten,grijs	212
17.00 - 18.00	zand,matig fijn met schelpresten,grijs	212
18.00 - 19.00	zand,matig fijn schelp en kleiresten,grijs	212
19.00 - 20.00	zand,matig fijn met schelpresten,grijs	212
20.00 - 21.50	zand,matig fijn,grijs	212
21.50 - 22.00	zand,matig fijn tot fijn sterk schelphouden,grijs	150/212
22.00 - 23.00	zand,fijn tot matig fijn,grijs	212
23.00 - 24.00	zand,,matig fijn met hout en schelpresten,grijs	212
24.00 - 24.50	zand,matig fijn met kleibrokjes,grijs	300
24.50 - 26.00	klei,licht humeus,licht zandig,grijs	



Schijf Grondboringen B.V.

	Formulier	Doc.code:	OPR
		Pagina:	4 / 4
	Opleverrapportage	Datum:	16-07-10
		Versie:	1.0

Plaats	Wolphaarsdijk		
Locatie	Meerkoetweg		
Uitvoeringsperiode	19-5-2023		
Boringnummer/code	B2/proefboring		
Boorsyst./diam.	Zuigboring/240		
Opdrachtgever	KWR-Water		
Boormeester	M Schijf		
Einddiepte	52.00		
Hulp-boormeester	M Elings		
Boorspoeling / additieven	0	Hoeveelheid werkwater	7m³
XY-coördinaten	51.518891 3.751727		

Kleiafdichting			
kleiafdichting 00	00.00-02.00	kleiafdichting 00	35.00-35.50
grind 1-1.6	02.00-03.00	grind 1-1.6	35.50-38.70
kleiafdichting 00	03.00-06.50	kleiafdichting 00	38.70-42.80
grind 1-1.6	06.50-08.20	grind 1-1.6	42.80-52.00
kleiafdichting 300	08.30-08.70		
grind 1-1.6	08.70-12.50		
kleiafdichting 00	12.50-13.00		
grind 1-1.6	13.00-19.00		
kleiafdichting 00	19.00-19.50		
grind 1-1.6	19.50-24.50		
kleiafdichting 300	24.50-25.50		
grind 1-1.6	25.50-27.50		
kleiafdichting 00	27.50-29.50		
grind 1-1.6	29.50-35.00		

Grondwaterinformatie				
m-mv	3,54	1	PH / EC	12,3
m-mv	3,49	2	PH / EC	20+ ???
m-mv	3,5	3	PH / EC	20+ ???
m-mv			PH / EC	
m-mv			PH / EC	