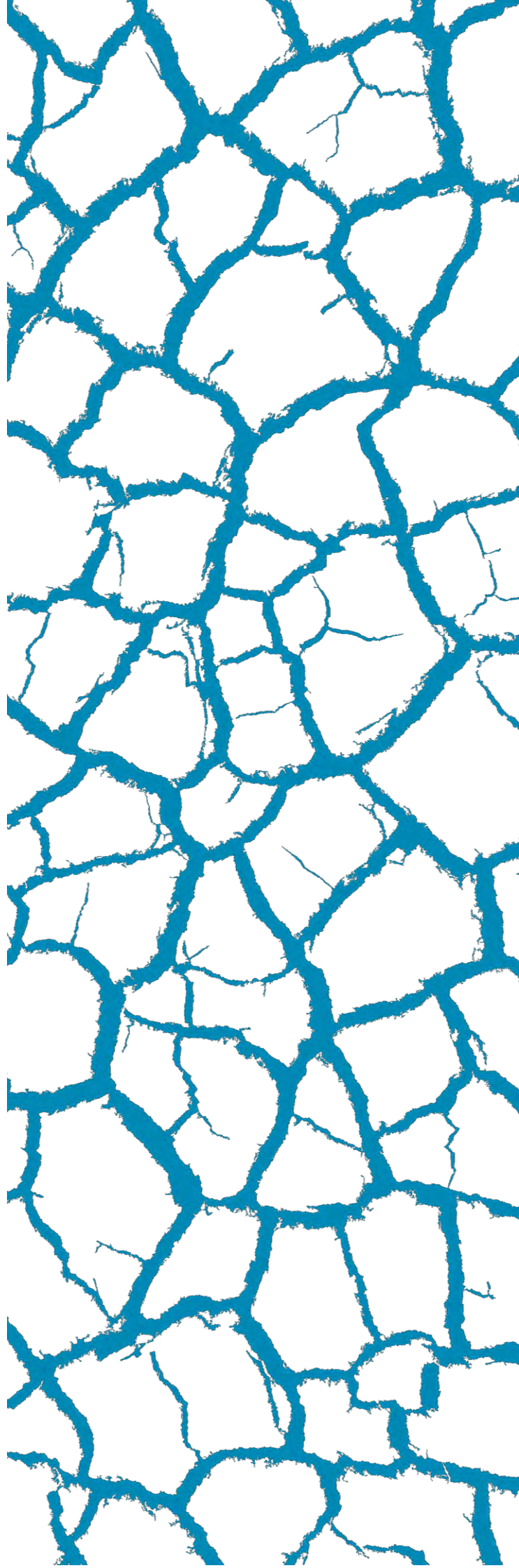




Duurzaam winbaar zoet grondwater

*Onder Zuidelijk en Oostelijk
Flevoland*





Duurzaam winbaar zoet grondwater

*Onder Zuidelijk en Oostelijk
Flevoland*

Opdrachtgever: provincie Flevoland
Projectnummer: 18.39.35
Datum: 15-4-2019
Auteur(s): W. Beekman,
F. Schaars

© 2019 Artesia B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag 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, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Criteria	9
1.3 De berekeningen.....	11
1.4 Leeswijzer.....	12
2 Modelkeuze	13
2.1 Omzetting Modelcode	13
2.2 Toevoegen grensvlak-modellering	13
2.3 Modelvalidatie.....	13
2.4 Modelinvoer.....	15
2.4.1 Grondwaterexploitatie	15
2.4.2 Zoet~Zout verdeling	15
3 Scenario's	19
3.1 Stijghoogte-criterium.....	19
3.1.1 Ontwikkelruimte voor de huidige vergunde situatie.....	19
3.1.2 Uitbreiding Holk en Eemdijk	20
3.2 Verziltingscriterium	20
3.2.1 Ontwikkelruimte voor de huidige vergunde situatie.....	20
3.2.2 Uitbreiding Holk en Eemdijk	21
3.3 Ruimte voor extra winningen in Flevoland	22
3.4 Ontwikkeling zoetwatervoorraad	22
3.4.1 Autonome ontwikkeling.....	23
3.4.2 Ontwikkeling zoetwatervoorraad onder verschillende winscenario's	24
4 Optimalisatie winningsruimte	27
4.1 Verdrogingscriterium 3 cm.....	27
4.2 Verdrogingscriterium 10 cm.....	29
5 Kwetsbaarheid winning uit diep grondwater.....	33
5.1 Kwetsbaarheid van winningen	33
6 Conclusies	36
6.1 Verdrogingsrisico.....	36

6.2	Verziltingsrisico's	36
6.3	Exploitatieruimte zoet grondwater	36
6.4	Kwetsbaarheid winningen.....	37
6.5	Reikwijdte conclusies	38
	Literatuur	39
Bijlage 1	Optimale verdeling.....	41
Bijlage 2	Optimale verdeling in boringsvrije zone.....	45
Bijlage 3	Geologische dwarsprofielen.....	52
Bijlage 4	Chloride verdeling ondergrond.....	53

Samenvatting

Als bouwsteen voor het drinkwaterbeleid in Flevoland is de omvang, de dynamiek en de robuustheid van de voorraad zoet grondwater onder Zuidelijk en Oostelijk Flevoland onderzocht. Daarmee is inzicht verkregen in de effecten die exploitatie van zoet grondwater heeft op deze voorraad en op verdrogingseffecten in grondwaterafhankelijke natuurgebieden in Flevoland en omliggende provincies. Het onderzoek gaat met name in op de volgende vragen:

1. Wat is de winningsruimte onder Flevoland in het licht van verdrogingseffecten onder natuurgebieden in Flevoland en de omliggende provincies?
2. Wat is de winningsruimte onder Flevoland in het licht van het verziltingsrisico?
3. Wat zijn de gevolgen van het benutten van de winningsruimte voor de zoetwatervoorraad onder Flevoland?
4. Wat is de relatie met winningen in Gelderland en Utrecht?
5. Wat is de kwetsbaarheid voor antropogene beïnvloeding van het onttrokken water, afhankelijk van de winlocatie?

Uit het onderzoek blijkt dat er aan de winning van diep zoet grondwater op veel plaatsen verdrogingsrisico's kleven. In Zuidelijk Flevoland is de doorwerking relatief gering, maar in Oostelijk Flevoland is de doorwerking naar het freatische grondwater groot. Hier liggen echter weinig kwetsbare natuurgebieden. Toename van de winning in Gelderland en Utrecht levert sterke beperkingen op voor de grondwaterwinning in Flevoland uit het oogpunt van verdrogingsrisico's.

Voor de risico's op verzilting gelden andere gevoeligheden. De huidige zoetwater verbreiding in het diepe grondwater beperkt de winning van grondwater tot een relatief smalle strook in Oostelijk Flevoland, terwijl onder Zuidelijk Flevoland een grote zoetwatervoorraad aanwezig is, gevoed door het Veluwesysteem. De winning van dit water kan op veel plaatsen duurzaam plaatsvinden, maar wordt wel begrensd door de natuurlijke aanvoer. De winning Spiekzand loopt een verziltingsrisico indien elders in Zuidelijk Flevoland de winning wordt opgeschroefd.

De totale exploitatieruimte van zoet diep grondwater bedraagt circa 20 Mm³/jr. Indien het verdrogingsrisico minder zwaar telt, loopt de exploitatieruimte op tot ruim 50 Mm³/jr. Circa de helft hiervan kan onder de bestaande boringsvrije zone worden geplaatst. Deze zone garandeert een goed beschermde waterkwaliteit, terwijl buiten de boringsvrije zone het aandeel recent (minder dan 100 jaar verblijftijd) geïnfiltreerd water (en daardoor mogelijk besmet met verontreinigingen) kan oplopen tot 50%.

De beoordeling van het verdrogingsrisico gaat uit van de huidige vergunde omvang van de grondwaterwinning in Flevoland als startpunt. Deze referentiesituatie is uiteraard cruciaal voor de waardering van de effecten van een toekomstig onttrekkingsniveau, in verband met stapeling van effecten.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Ter onderbouwing van het drinkwaterbeleid is aanvullende informatie nodig over de omvang en de dynamiek van de voorraad zoet grondwater onder Zuidelijk en Oostelijk Flevoland. Daarnaast is nader inzicht gewenst in de effecten die exploitatie van zoet grondwater heeft op deze voorraad en op verdrogingseffecten in grondwaterafhankelijke natuurgebieden in Flevoland en omliggende provincies. In 2004 is een verkennende studie uitgevoerd (Beekman, et al. 2004) naar de uitbreidingsmogelijkheden op de bestaande winplaatsen. In deze regionale studie gaat het om een actualisering van die analyse op basis van voortschrijdende gebiedskennis en verbeterd rekeninstrumentarium. Bovendien is de vraag niet gericht op de winningsmogelijkheden op de bestaande winplaatsen maar op een globaal beeld voor Zuidelijk en Oostelijk Flevoland. De volgende vragen liggen voor:

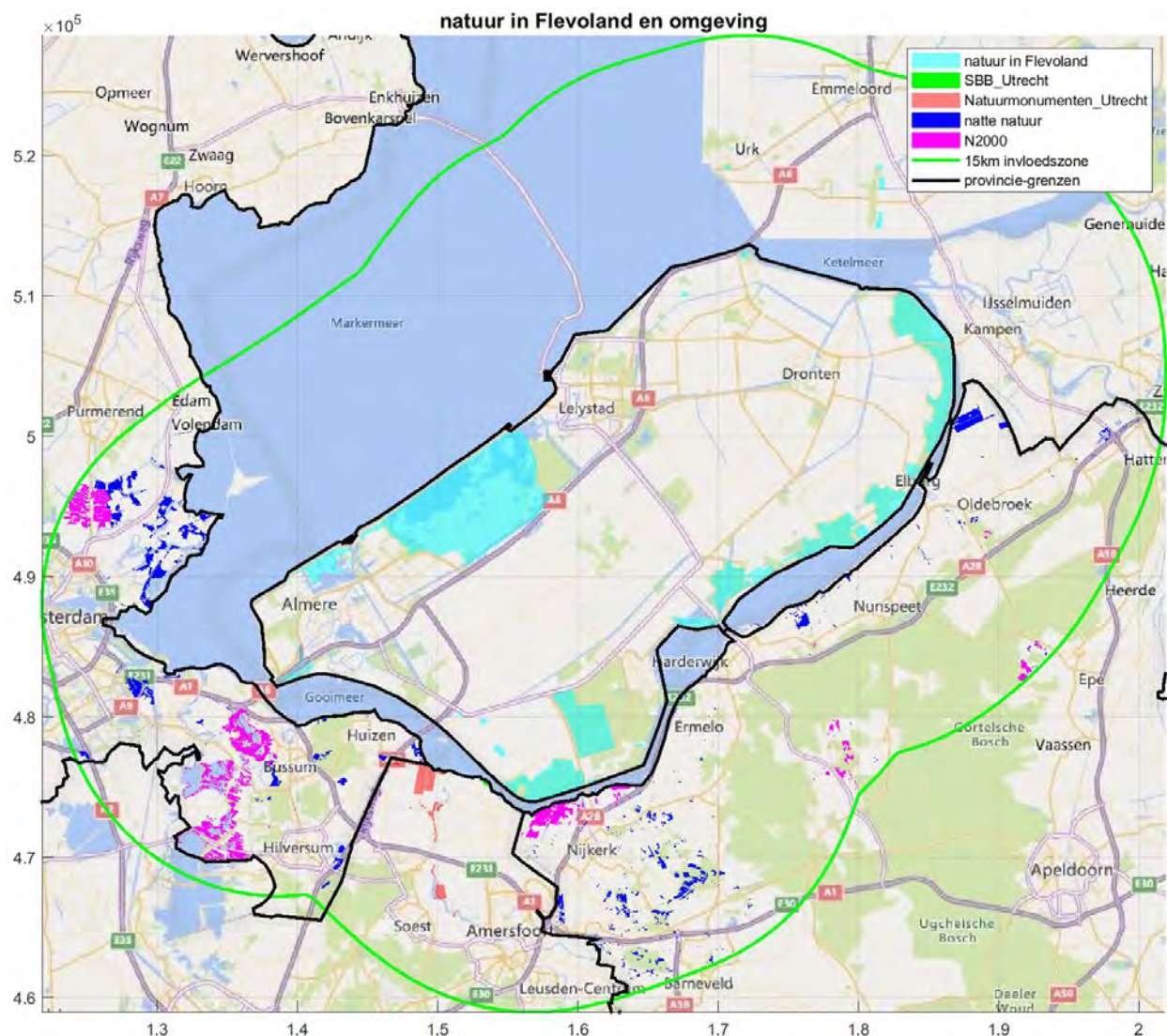
1. Wat is de winningsruimte onder Flevoland in het licht van geïnduceerde verdrogingseffecten onder natuurgebieden in Flevoland en de omliggende provincies?
2. Wat is de winningsruimte onder Flevoland in het licht van het verziltingsrisico?
3. Wat zijn de gevolgen van het benutten van de winningsruimte voor de zoetwatervoorraad onder Flevoland?
4. Wat is de relatie met winningen in Gelderland en Utrecht?
5. Wat is de kwetsbaarheid voor antropogene beïnvloeding van het onttrokken water, afhankelijk van de winlocatie?

1.2 Criteria

Om deze vragen te kunnen beantwoorden zijn maatstaven, criteria en begrenzings nodig, waaraan de gevolgen van een grondwateronttrekking getoetst kunnen worden. De eerste vraagstelling vergt begrenzing van relevante natuur in en om Flevoland en criteria en een maatstaf voor het beoordelen van verdrogingseffecten. De tweede vraag vergt een begrenzing tussen zoet en zout grondwater onder Flevoland en een maatstaf voor verzilting. De derde vraag vergt een keuze voor een te toetsen scenario, waarin de winning op het Oude Land is verhoogd. De vierde vraag tot slot behoeft een concept voor het definiëren van kwetsbaarheid. Deze begrenzings en criteria zijn als volgt tot stand gekomen:

1. De begrenzing van natuur in Flevoland en omgeving is een compilatie van de als zodanig aangemerkte gebieden door respectievelijk de provincies Flevoland, Gelderland, Utrecht en Noord Holland. De natuurgebieden zijn vervolgens begrensd door de 15 km-contour rond de buitengrens van de provincie Flevoland. Het resultaat is weergegeven in figuur 1
2. Het verdrogingscriterium bestaat uit een referentiesituatie en een effectcriterium. Als referentiesituatie is de huidige vergunde omvang van de grondwaterwinning in Flevoland genomen, bij de huidige inrichting van de polder. Voor het effectcriterium zijn 2 waarden gehanteerd:
 - a. Een stijghoogte-effect van 3 cm in het eerste watervoerende pakket onder een (grondwaterafhankelijk) natuurgebied. Dit is het beleids criterium dat de provincie Flevoland hanteert voor het beoordelen van grondwatervergunningen.
 - b. Een stijghoogte-effect van 10 cm in het eerste watervoerende pakket onder een (grondwaterafhankelijk) natuurgebied. Dit is een verruiming ten opzichte van het beleids criterium, waarmee zicht ontstaat op de gevoeligheid van het criterium.

3. Het verziltingsvraagstuk vergt een begrenzing van het zoete water. Deze is bepaald door interpolatie van de metingen binnen Flevoland. Deze begrenzing is weergegeven in figuur 4 (blz. 16). De metingen en de daarvan afgeleide contouren zijn opgenomen in Bijlage 4.
4. Voor verzilting wordt als maatstaf gehanteerd dat er geen stroomlijnen uit de brakke zone in de winning mogen uitkomen.
5. De zoetwatervoorraad wordt gedefinieerd als het grondwater dat begrensd wordt door de (oostelijke) provinciegrens en het zoet-brak grensvlak van 150 mg Cl/l in de formaties van Peize/Waalre (modellagen 6 t/m 8, zie Bijlage 3)
6. De relatie met winningen in Gelderland en Utrecht wordt gelegd door de (verandering van de) winningsruimte te bepalen voor een scenario, waarin de onttrekking op Holk wordt verhoogd van 5 naar 10 Mm³/jr en op Eemdijk van 5 naar 8 Mm³/jr.
7. De kwetsbaarheid wordt gedefinieerd als de fractie van het onttrokken water op een bepaalde locatie, met een verblijftijd van minder dan 100 jaar, gerekend vanaf maaiveld.



figuur 1: Grondwaterafhankelijke natuur in en rond Flevoland

1.3 De berekeningen

De berekeningen voor het vaststellen van de winningsruimte zijn gebaseerd op de uitkomsten van een 'wandeland pompstation' op een grid van 200 meter, over het gehele territorium van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland. Hierbij wordt successievelijk in het model een winning van 1 Mm³/jr geplaatst in het diepe watervoerende pakket (conform de bestaande winningen) en doorgerekend op verlagingen. De verlagingen die een grotere onttrekkingen zou hebben zijn door superpositie bepaald. Van elk punt is vervolgens bepaald bij welk debiet het verdrogingscriterium wordt overschreden.

Op vergelijkbare wijze wordt van elk punt voor oplopende debieten, op basis van het stijghoogtebeeld de toestroming bepaald. Indien een stroomlijn beginnend op het zoet-zout grensvlak in een put uitkomt, valt die putlocatie voor dat debiet af op basis van het verziltingscriterium.

Voor het bepalen van de optimale configuraties zijn aparte berekeningen uitgevoerd. De volgende procedure is daarvoor gevolgd:

- o De winningen hebben een omvang van respectievelijk 1 en 3 Mm³/jr
- o De minimale onderlinge afstand van winningen bedraagt respectievelijk 600 m en 1000 m
- o De toelaatbare verdroging in het eerste watervoerende pakket onder natuurgebieden is respectievelijk 3 en 10 cm
- o Voor deze condities worden de locaties bepaald, die gezamenlijk een maximale opbrengst op zouden leveren
- o Winningen die vervolgens zouden verzilten worden uit de selectie verwijderd, waarna opnieuw de optimale locaties worden bepaald
- o Eventuele verzilting van bestaande winningen wordt in de optimalisatie niet uitgesloten, maar wel in beeld gebracht

Ook voor de berekening van de kwetsbaarheid zijn aparte berekeningen uitgevoerd. Hierbij is de volgende procedure gevolgd:

- o Binnen de begrenzing van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland zijn op een grid van 2 km stroomlijnmodellen gemaakt van winningen met een omvang van respectievelijk 1 en 3 Mm³/jr uit het diepe watervoerende pakket (Formatie van Peize/Waalre, zie Bijlage 3)
- o Voor elk van deze locaties is een kwetsbaarheidskarakteristiek bepaald op basis van de leeftijdsverdeling van het onttrokken water. De kwetsbaarheid is weergegeven als het aandeel water met een verblijftijd van minder dan 100 jaar

In tabel 1 zijn de karakteristieken van de uitgevoerde berekeningen weergegeven.

tabel 1: Overzicht van de uitgevoerde berekeningen (het grid geeft de minimale afstand tussen individuele winningen weer en bepaalt daarmee het aantal berekeningen en de omvang van de som bij de bepaling van de maximale configuratie)

criterium	methode	Grid (m)	Debiet (Mm ³ /jr)	Verdrogingscriterium (cm)	uitkomst
Verdroging	Wandelend pompstation	200	1	3 en 10	Bepaling capaciteit-zonering voor plaatsing extra winningen door superpositie per locatie
Verziltig	Stroomlijnen vanaf grensvlak	Afleiden stromingsgradiënten uit stijghoogteveld, gebaseerd op uitkomsten wandelend pompstation		3 en 10	Bepaling capaciteit-zonering voor plaatsing extra winningen door iteratie per locatie
Maximale configuratie	Modelberekening per configuratie. Configuratie berekend via lineaire programmering (optimale locaties) en iteratie (uitsluiten verziltende locaties)	600 en 1000	1 en 3	3 en 10	Maximaal winbaar grondwater in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland Ontwikkeling zoetwatervoorraad
Kwetsbaarheid	Modelberekening stroomlijnenmodel	2000	1 en 3	n.v.t.	Responscurve en aandeel jonger dan 100 jaar per locatie

1.4 Leeswijzer

Het rapport heeft de volgende opbouw:

- Hoofdstuk 1: de inleiding behandelt de vraagstelling en de aanpak.
- Hoofdstuk 2: gaat in op de modelkeuze en de aanpassingen die daarop zijn doorgevoerd
- Hoofdstuk 3: beschrijft de winningsruimte voor de stijghoogtecriteria en het verziltingscriterium en voor de combinatie daarvan.
- Hoofdstuk 4: beschrijft de optimale configuratie van winningen bij een maximale benutting van het diepe grondwater binnen de gestelde criteria
- Hoofdstuk 5: beschrijft de kwetsbaarheid van de winningen voor antropogene verontreinigingen, los van de andere criteria
- Hoofdstuk 6: geeft de conclusies ten aanzien van duurzaam winbaar grondwater in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland.

2 Modelkeuze

Voor deze studie is een grondwatermodel nodig dat kan omgaan met dichtheidseffecten en de verplaatsing van waterkwaliteiten. De definitie van de zoetwatervoorraad als een entiteit vraagt om het schematiseren van watertypen doormiddel van grensvlakken.

Als basis voor de berekening van de zoetwatervoorraad is voor het model AZURE gekozen. Dit model is operationeel voor Flevoland en de aangrenzende zone. Daarnaast dient het model reeds als basis voor veel studies in het IJsselmeergebied. Dit model heeft de meest recente samenhangende geohydrologische schematisatie van de ondergrond, in samenhang met de waterhuishoudkundige inrichting van de polder. Voor de toepassing binnen deze studie zijn een aantal aanpassingen doorgevoerd. Deze zijn in de volgende paragraaf beschreven.

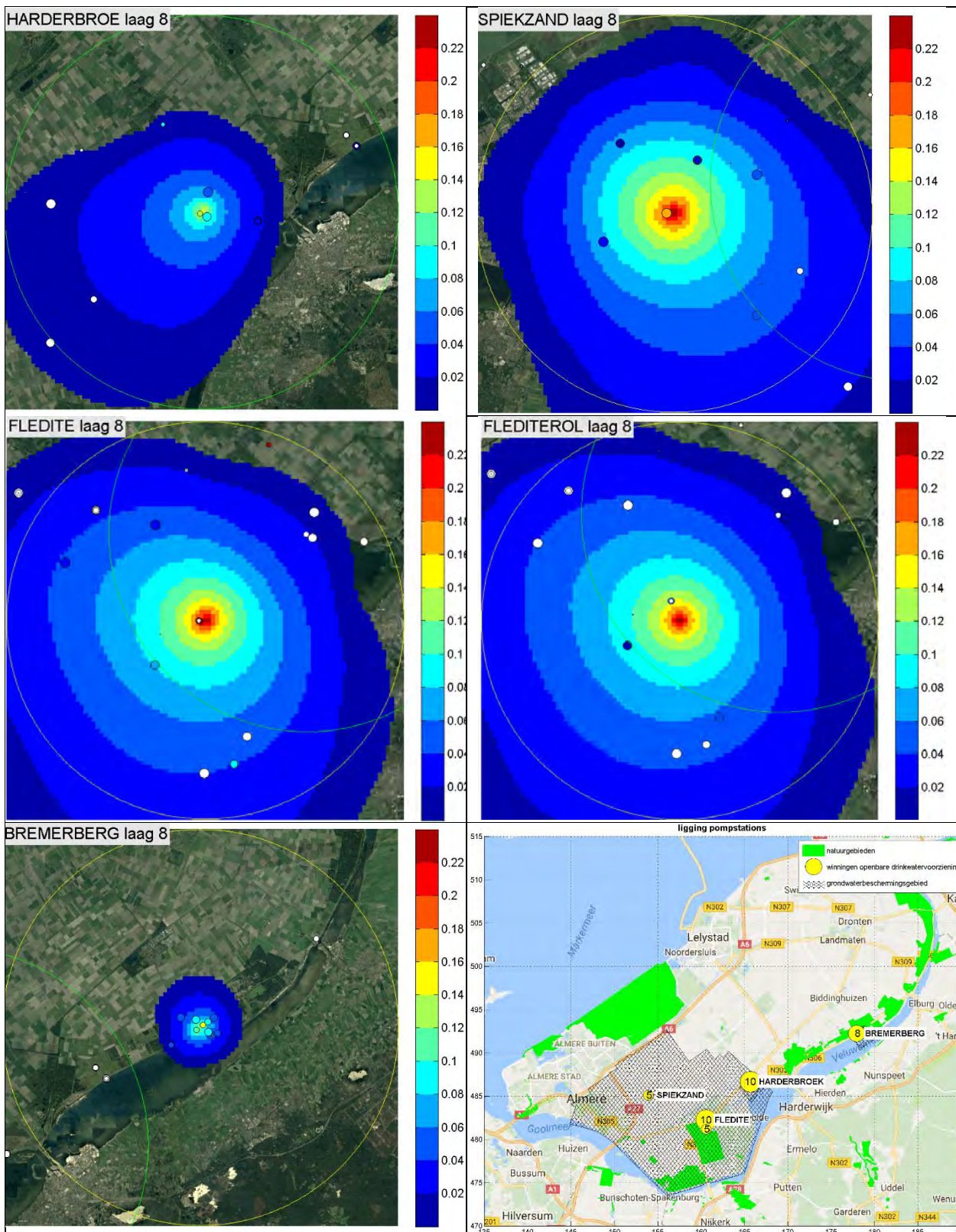
2.1 Omzetting Modelcode en toevoegen grensvlak-modellering

Het grondwatermodel AZURE is niet zonder meer geschikt voor het berekenen van de ontwikkeling van de zoetwatervoorraad: de rekencode van AZURE kan niet omgaan met dichtheidseffecten en grensvlakken tussen watertypen. Daarom is AZURE omgezet naar standaard MODFLOW2005 en is een concept voor grensvlakberekening in relatie tot dichtheidseffecten toegevoegd. Deze functionaliteit is opgenomen in de mede door Artesia ontwikkelde SWI-package (Bakker, et al. 2013).

De omzetting van AZURE naar standaard MODFLOW gaat gepaard met enig functieverlies van schematisatie-concepten, die in AZURE zijn opgenomen, maar geen standaard MODFLOW zijn. De belangrijkste daarvan zijn de schematisatie van anisotropie en de beschikbare detailleringen van het top-systeem. De effecten van dit functieverlies zijn binnen Flevoland beperkt (geen anisotropie gedefinieerd) of voor het doel van de studie weinig relevant (verdeling van fluxen over verschillende drainage-systemen), terwijl de studie zich richt op effecten van grondwaterexploitatie in het grondwater.

2.2 Modelvalidatie

Het model is in eerste instantie gecontroleerd op de correcte schematisatie van de winningen. De juiste onttrekkingsdebieten en de juiste exploitatie-dieptes zijn daarbij toegekend aan de winningen van de openbare drinkwatervoorziening. Vervolgens zijn rond die winningen de mate van overeenkomst tussen de berekende en gemeten vorm van de onttrekkingskegel gecontroleerd. Een correcte benadering van de vorm van de verlagingskegel rond een winning is namelijk bepalend voor de begrenzing van de zone van waaruit grondwater wordt aangetrokken. Indien brakwater binnen het intrekgebied van de winning ligt, ontstaat het risico op verzilting. Deze controle kan alleen rond de winningen worden uitgevoerd en geven daar een indicatie van de betrouwbaarheid van de modelresultaten met betrekking tot de op te wekken verplaatsingen van het grensvlak in de diepe waterpakketten. De 'gemeten' vorm van de onttrekkingskegel blijkt niet direct uit de metingen, maar kan daaruit worden afgeleid met behulp van tijdreeksanalyse. De resultaten daarvan zijn opgenomen in figuur 2.



figuur 2: Berekende specifieke verlagingen (meter per Mm³/jr) rond de drinkwaterwinningen in Flevoland in de waarnemingsfilters tegen een achtergrond van de berekende verlaging met het grondwatermodel. In de witte bolletjes werd geen invloed van de winning aangetoond met tijdreeksanalyse. De grootte van het bolletje geeft de betrouwbaarheid van het tijdreeksmodel.

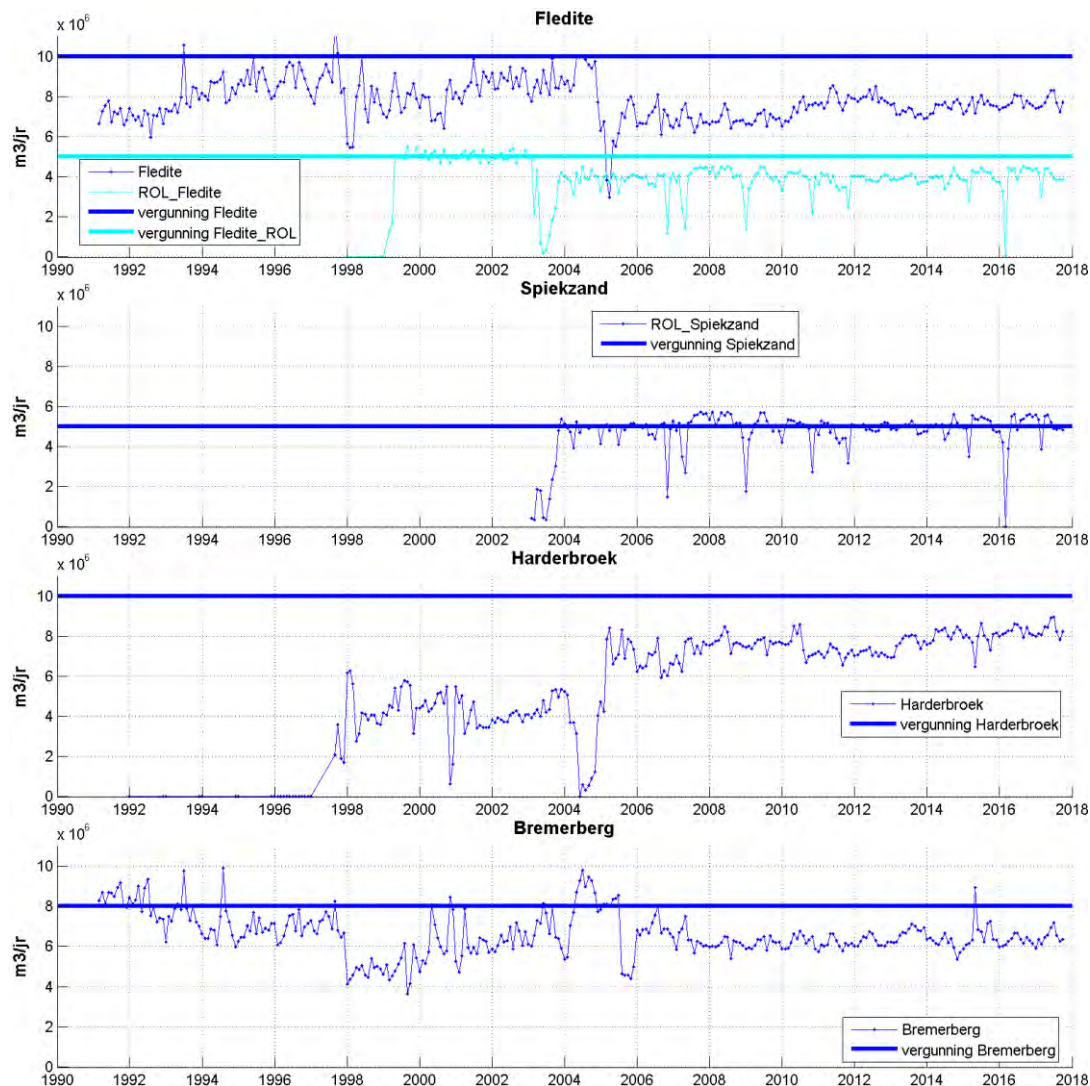
In veel meetpunten op grotere afstand van de winningen kon de invloed van de winning niet betrouwbaar worden bepaald met een tijdreeksmodel. Voor meetpunten in de buurt van de winning is de invloed van de winning uiteraard dominant en levert tijdreeksanalyse een goede schatting van de verlaging door de winning. Door combinatie van de meetpunten in de verschillende lagen is een globaal verlagingbeeld

gevormd waaraan het grondwatermodel kan worden getoetst en zo nodig lokaal kan worden aangepast. In figuur 2 zijn de resultaten van de overeenkomst in laag 8 na model-aanpassing weergegeven. Rond de winningen Fledite en Harderbroek is op basis van deze analyse een parameteraanpassing doorgevoerd.

2.3 Modelinvoer

2.3.1 Grondwaterexploitatie

In Flevoland wordt het diepe grondwater vrijwel uitsluitend geëxploiteerd ten dienste van de openbare drinkwatervoorziening. Van de totaal vergunde 38 Mm³/jr wordt momenteel circa 32 Mm³/jr daadwerkelijk gewonnen.



figuur 3: Verloop van de onttrekkingen, in relatie tot de vergunde winning

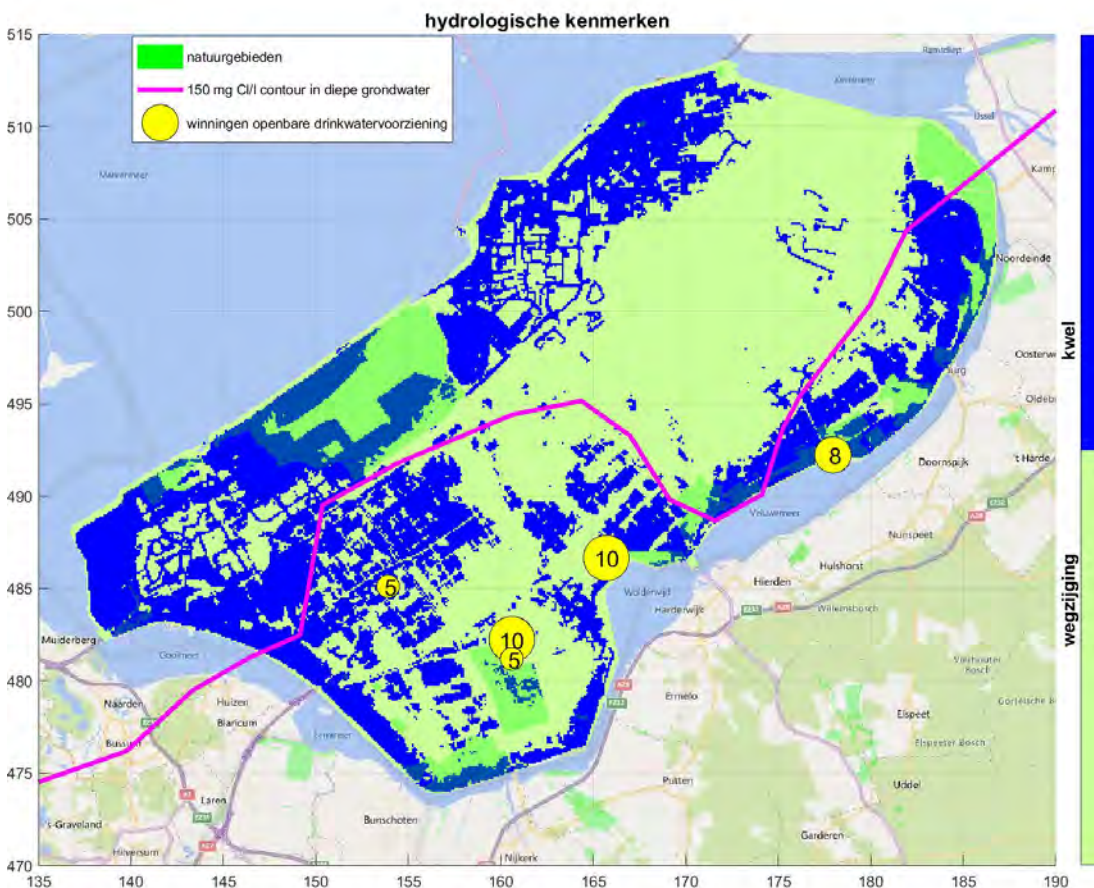
2.3.2 Zoet~Zout verdeling

Als voormalige binnensee, speelt zoutwater in de ondergrond een belangrijke rol. De dynamiek van verzilting en ontzilting verloopt parallel met de grondwaterverversing. In de bovenste bodemlagen verloopt de verversing snel, onder invloed van drainage, maar op diepte is de grondwaterstroming zeer beperkt en lopen verblijftijden op tot geologische tijdschalen.

De huidige verdeling van watertypen is daarom geen evenwichtssituatie, maar is aan de andere kant over het algemeen weinig dynamisch. Alleen nabij significante grondwateronttrekkingen zal de verdeling van watertypen zich relatief snel aanpassen aan de geïnduceerde stromingspatronen. De belangrijkste onttrekking wordt gevormd door de polder zelf. Het uitgeslagen volume op jaarbasis bedraagt circa 675 Mm³, waarvan ruim de helft afkomstig is van het lokale neerslagoverschot een kleine 40% uit kwelwater bestaat, dat rondom wordt aangetrokken en 10% uit eerder ingelaten water. Ten gevolge van deze kwel treedt er globaal verzoeting op vanuit het oude land langs de zuidoost rand van Flevoland. Aan de IJsselmeerzijde is ook een kwelzone actief, die water met een grotere kwaliteitsrange aanvoert. Daarnaast vormen grondwaterwinningen lokale factoren die de verbreiding van grondwatertypen beïnvloeden.

De gegevens van de verbreiding van de waterkwaliteit zijn verzameld in het kader van de zoet-zout studie van Deltares (Essink, et al. 2008). Op basis van deze metingen van de chloride-concentratie in grondwater op verschillende dieptes, blijken een aantal bijzondere verspreidingspatronen. In zijn algemeenheid varieert de zoutconcentratie van het grondwater tussen zoet (<300 mg Cl/l) en brak (300-5000 mg Cl/l). Zeewaterconcentraties worden nergens aangetroffen. Het ondiepe grondwater langs de zuid-west en de zuid-oost rand van Flevoland is verzoet. In Zuidelijk Flevoland blijkt echter een hardnekkige tong van brakker water, die over de hele breedte van de polder insteekt (zie bijlage Bijlage 4). Deze tong valt samen met een geulensysteem, die daar mogelijk verband mee houdt.

Van de diepere grondlagen onder Zuidelijk Flevoland valt op dat deze voor een belangrijk deel zoet zijn (zie figuur 4). Deze verbreiding houdt verband met afsluitende kleilagen, waaronder het afstromende grondwater vanaf de Veluwe gevangen blijft. In Oostelijk Flevoland concentreert de verzoeting zich nog tot een strook langs het Veluwemeer, waar ook een sterke kwel vanuit het Veluwemeer en de Veluwe optreedt.



figuur 4: zoet-brak grensvlak in het diepe pakket en verdeling van kwel en wegzijing binnen de polders

Op basis van deze gegevens van de zoet- en brakwaterverdeling konden voor de modellen 6, 7 en 8 grensvlakken worden geïnterpoleerd. Deze grensvlakken zijn als initieel grensvlak in het model gebracht. Dit grensvlak is arbitrair een aantal jaren doorgerekend om de vorm van het grensvlak te laten aansluiten bij een vorm die past bij het stromingsbeeld. Voor de dichtheidssprong over het grensvlak is het soortelijk gewicht van 10% zeewater aangenomen, aansluitend bij de gemiddelde concentratie van de brakwatervoorkomens.

3 Scenario's

De ruimte voor extra winningen uit het diepe grondwater is bepaald met behulp van een 'wandeland pompstation'. Met deze methode wordt achtereenvolgens de verlaging berekend van een winning van 1 Mm³/jr in elke cel van het model (binnen Flevoland) inclusief en ten opzichte van een situatie waarin de bestaande winningen op vergund debiet draaien. De ruimte tot het bereiken van een stijghoogte-criterium wordt vervolgens door superpositie bepaald. Daarnaast is met het model berekend wat de gevolgen zijn van uitbreiding van de winning op Holk (met 5 Mm³/jr) en Eemdijk (met 3 Mm³/jr).

De toetscriteria zijn als volgt gedefinieerd:

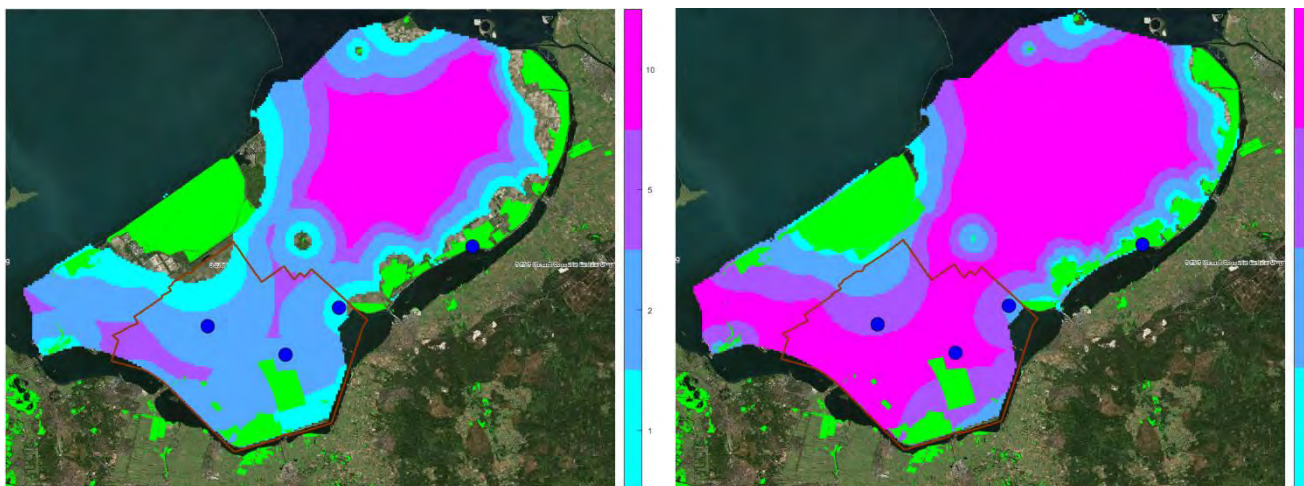
- Maximaal 3 cm verlaging in het eerste watervoerend pakket onder 1 van de als kwetsbaar gedefinieerde natuurgebieden
- Maximaal 10 cm verlaging in het eerste watervoerend pakket onder 1 van de als kwetsbaar gedefinieerde natuurgebieden
- Geen kans op verzilting van de geplaatste winning

De resultaten worden weergegeven als zones waar op basis van een stijghoogtecriterium ruimte is voor extra winning, onderverdeeld in 4 klassen: 1, 2 5 of 10 Mm³/jr.

3.1 Stijghoogte-criterium

3.1.1 Ontwikkelruimte voor de huidige vergunde situatie

De ruimte voor extra grondwaterwinning uit het diepe grondwater volgens beide verdrogingscriteria is weergegeven in figuur 5:

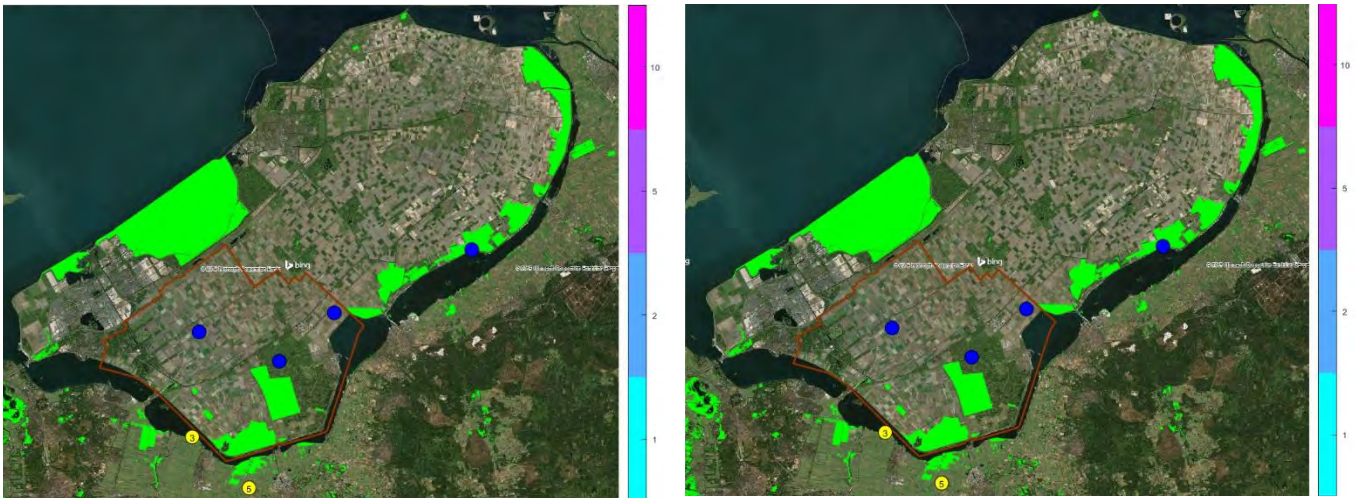


figuur 5: Ruimte voor extra winning, bij een maximale verlaging in kwetsbare natuurgebieden van respectievelijk 3 cm (links) en 10 cm (rechts). De kleur geeft de omvang van de winning die geplaatst kan worden. Ter referentie zijn de boringsvrije zone (rode lijn) en de winningen van de openbare drinkwater-voorziening (blauwe stippen) opgenomen. De kwetsbare natuurgebieden zijn met groene vlakken weergegeven.

Uit figuur 5 blijkt dat Oostelijk Flevoland een groot potentieel heeft voor extra winning, zowel bij het 3 cm-criterium als het 10 cm-criterium. Deze ruimte bevindt zich echter vooral in de brakke zone van het diepe grondwater. In Zuidelijk Flevoland blijkt dat bij het 3cm-criterium nergens plaats is voor een extra winning van 10 Mm³/jr of meer. Indien men het 10 cm-criterium hanteert, biedt dat ook in Zuidelijk Flevoland ruimte voor grote winningen.

3.1.2 Uitbreiding Holk en Eemdijk

In het kader van de optimalisatie van de milieueffecten van de grondwaterwinning uit het Veluwesysteem is begin deze eeuw een deel van de benodigde grondwaterwinning verplaatst van het oude land naar Zuidelijk Flevoland. De winning Holk in Gelderland is met 5Mm³/jr gereduceerd en de winning Amersfoort Hogeweg is beëindigd (circa 4 Mm³/jr reductie). Momenteel wordt in Utrecht en Gelderland nagedacht over uitbreidingen van de winningen Eemdijk en Holk. De gevolgen van een dergelijke uitbreiding op de winningsmogelijkheden in Flevoland zijn daarom getoetst aan het stijghoogtecriterium en weergegeven in figuur 6.



figuur 6: Ruimte voor extra winning na vergroting van de winningen Holk (+5Mm³/jr) en Eemdijk (+3 Mm³/jr), bij een maximale verlaging in kwetsbare natuurgebieden van respectievelijk 3 cm (links) en 10 cm (rechts). De kleur geeft de omvang van de winning die geplaatst kan worden.

Uit figuur 6 blijkt dat deze extra winning op Holk en Eemdijk zou conflicteren met de gestelde criteria en in natuurgebieden in de directe omgeving van deze winningen een verdrogend effect zal optreden van meer dan 10 cm.

3.2 Verziltingscriterium

Het verziltingsrisico van een locatie is vastgesteld op basis van de resultaten van het wandelend pompstation. Daartoe is voor elke cel binnen het zoetwatergebied vanaf het initiële zoetwater-grensvlak het stroomveld bepaald. Indien er een stroomlijn vanaf het grensvlak eindigt in de winning, valt die winlocatie af, wegens een verziltingsrisico. Deze analyse wordt uitgevoerd voor de resultaten van het wandelend pompstation bij respectievelijk 1, 2, 5 en 10 Mm³/jr. en voor de eerder beschreven scenario's:

- Huidig vergunde exploitatie
- Uitbreiding op de winningen Holk en Eemdijk

De resultaten zijn weer op gelijke wijze weergegeven als zones waar op basis van het verziltingscriterium ruimte is voor extra winning, onderverdeeld in 4 klassen: 1, 2 5 of 10 Mm³/jr.

3.2.1 Ontwikkelruimte voor de huidige vergunde situatie

Het verziltingsrisico ligt uiteraard langs het huidige grensvlak van het zoete grondwater. Uit figuur 7 blijkt uit de breedte van de zoneringsvlakken dat de gevoeligheid onder Zuidelijk Flevoland groter is dan onder Oostelijk Flevoland. De grotere gespannenheid van het diepe grondwater onder Zuidelijk Flevoland leidt rond een winning tot een wijdere verlagingskegel en daardoor tot een groter intrekgebied.



figuur 7: Winruimte op basis van het verziltingscriterium bij winning op vergund niveau

3.2.2 Uitbreiding Holk en Eemdijk

De winningen Holk en Eemdijk hebben een relatief geringe invloed op de kwetsbaarheid voor verzilting. De resterende ruimte voor winning in Flevoland is weergegeven in figuur 8.

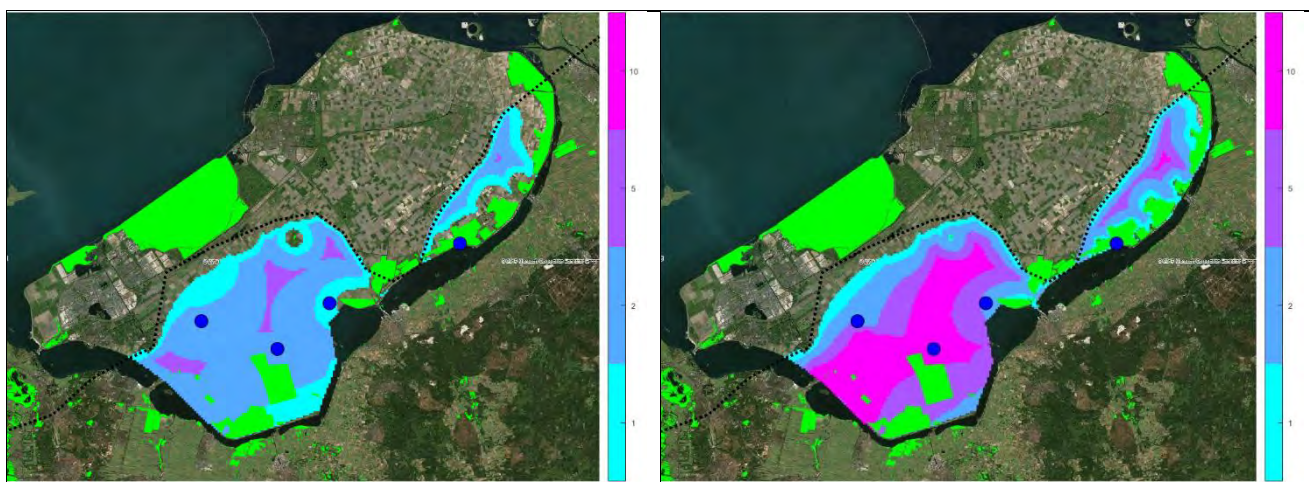


figuur 8: Winruimte op basis van het verziltingscriterium bij uitbreiding van de winning op Holk (+5Mm³/jr) en Eemdijk (+3Mm³/jr)

3.3 Ruimte voor extra winningen in Flevoland

De risico's op verzilting en op verdroging zijn ruimtelijk verschillend verdeeld en vormen elkaar aanvullende belemmeringen voor het toekennen van verruimingsmogelijkheden voor grondwaterwinning. Het verziltingscriterium bepaalt de uitsluiting van gebieden langs de noordwestelijke rand van de polder en geeft dus vooral een ruimtelijke beperking, terwijl het stijghoogtecriterium een sterke begrenzing van de toelaatbare winning oplevert (kwantitatieve beperking). De winningsruimte wordt met name bij het stijghoogtecriterium van 3 cm toelaatbare stijghoogtedaling onder kwetsbare natuurgebieden sterk ingeperkt. Het scenario 'Holk+Eemdijk' verbruikt de winningsruimte meer dan volledig, ook bij het stijghoogtecriterium van 10 cm.

De exploitatieruimte bovenop de huidige vergunde situatie van de grondwaterexploitatie is in figuur 9 weergegeven. De gekleurde vlakken begrenzen de zones waar met een bepaalde omvang grondwater gewonnen kan worden, waarbij zowel wordt voldaan aan het verziltingscriterium als aan het stijghoogtecriterium van 3 cm (linker deelfiguur) en 10 cm (rechter deelfiguur).



figuur 9: Berekende winningsruimte op basis van het verziltingscriterium en twee stijghoogtecriteria: 3 cm verdroging (links) en 10 cm toelaatbare verdroging in kwetsbare natuurgebieden (rechts)

3.4 Ontwikkeling zoetwatervoorraad

De winning van grondwater heeft naast stijghoogte effecten en verziltingsrisico's ook gevolgen voor de verbreiding van watertypen onder Flevoland en meer specifiek voor de voorraad zoet grondwater. Het effect van de grondwaterexploitatie op de voorraadontwikkeling van zoet grondwater is in drie scenario's onderling vergeleken:

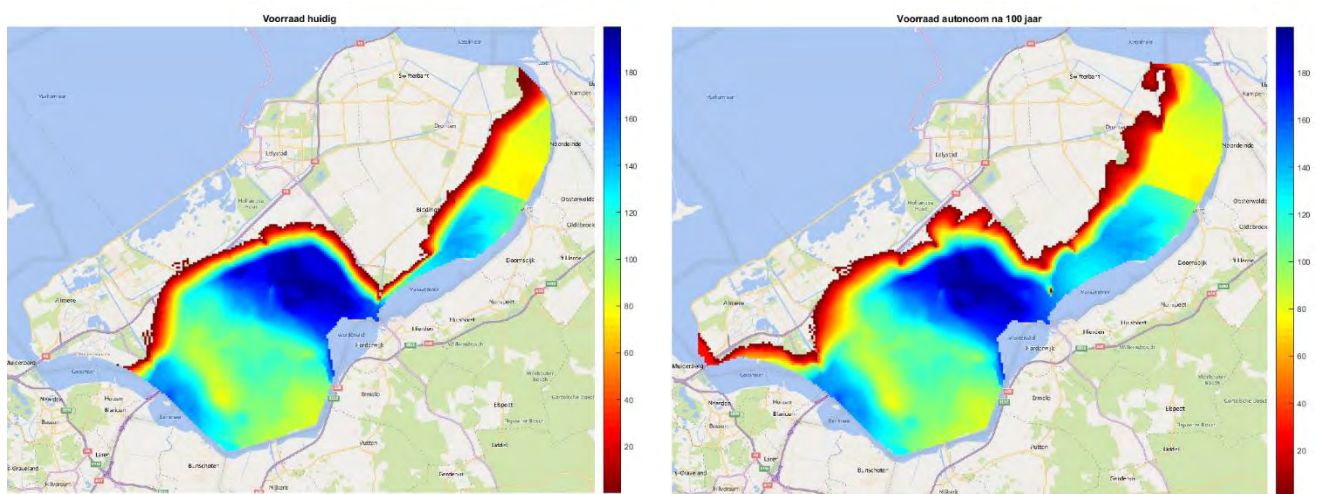
- voortzetting van de winning op de huidige locaties, maar op het niveau van het vergunde debiet
- maximale uitbreiding van de vergunde winning (zie hoofdstuk 4) onder respectievelijk het 3 en het 10 cm verdrogings-criterium.

3.4.1 Autonome ontwikkeling

De autonome ontwikkeling van de zoetwatervoorraad is onder de huidige exploitatiegraad van het grondwater (vergunde winning) nog gunstig, in die zin, dat het grondwatermodel vrijwel langs het gehele grensvlak, zoals dat op basis van de metingen is geïnterpoleerd, nog verzoeting berekent. In de onderstaande figuren is deze verzoeting in beeld gebracht in drie beelden:

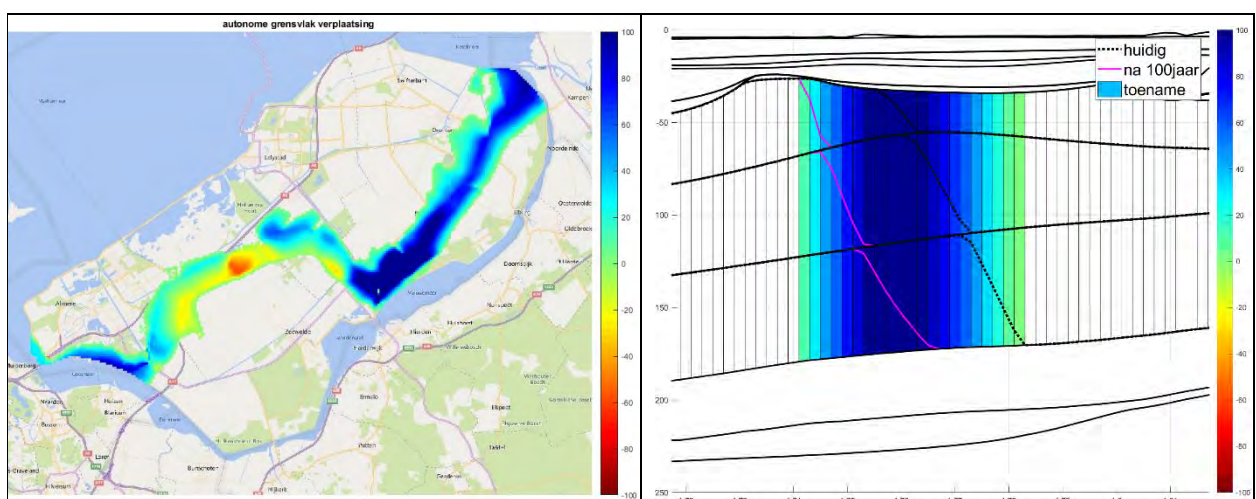
- De huidige zoetwatervoorraad in het diepe grondwater
- De voorspelde zoetwatervoorraad over 100 jaar bij een winning van diep grondwater op vergund niveau en gelijkblijvende overige omstandigheden
- Het verschil tussen beide situaties

De resultaten van de berekening van de ontwikkeling van de zoetwatervoorraad in het diepe grondwater is weergegeven in figuur 10.



figuur 10: Dikte (m) van de zoetwatervoorraad diep grondwater huidig (links) en over 100 jaar (rechts)

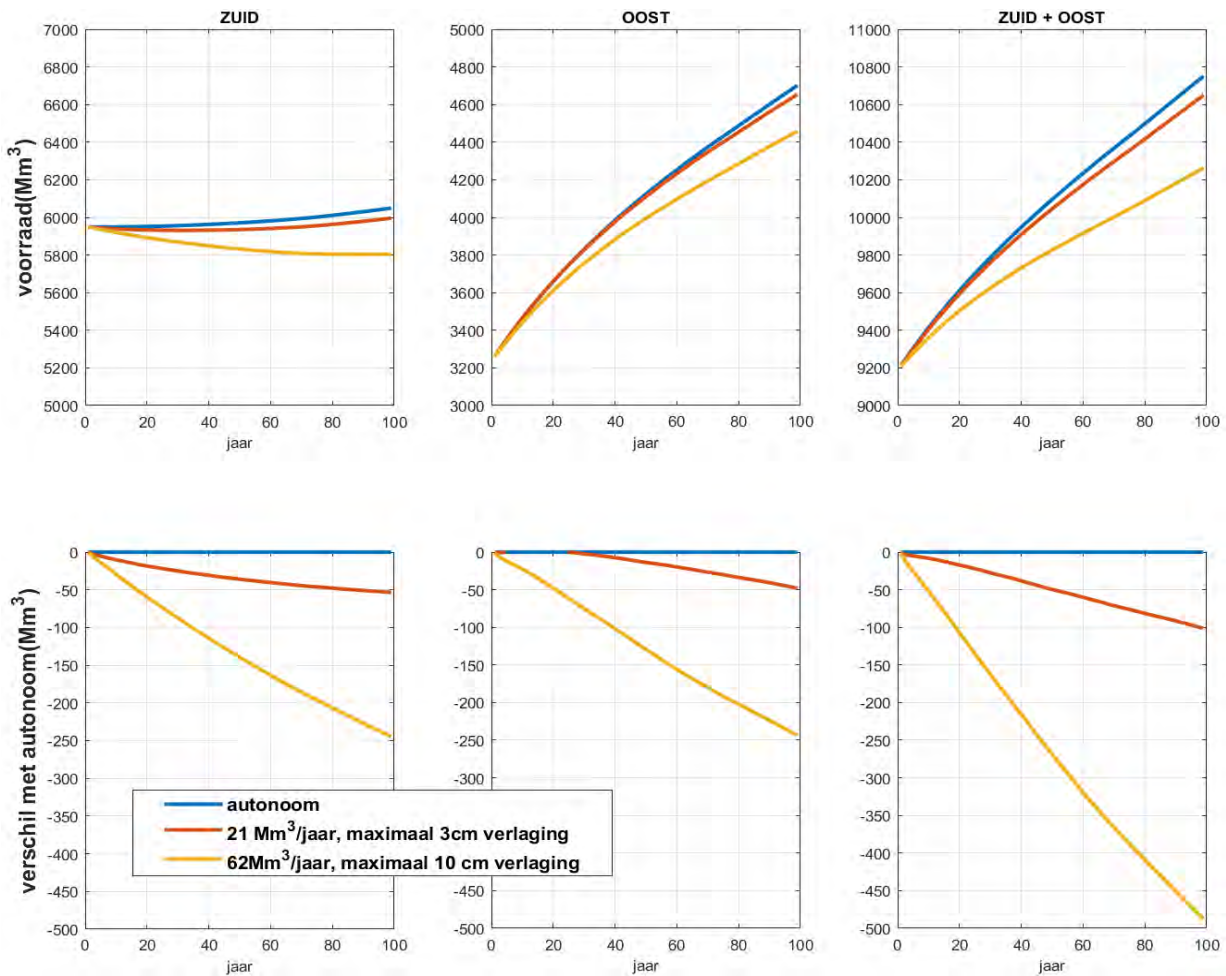
Uit figuur 10 blijkt dat er volgens het model vrijwel langs het gehele grensvlak verzoeting optreedt, waarbij de verzoeting in Oostelijk Flevoland groter is dan in Zuidelijk Flevoland. Alleen bij de Oostvaarders plassen loopt het grensvlak iets naar binnen. De omvang van de toename wordt in de verschilweergave in figuur 11 verder verduidelijkt.



figuur 11: autonome toename van de zoetwatervoorraad na 100 jaar vanaf nu, ruimtelijk en in dikte (m) (links) en in dwarsdoorsnede over het grensvlak in Oostelijk Flevoland (rechts)

3.4.2 Ontwikkeling zoetwatervoorraad onder verschillende winscenario's

In de vorige paragrafen is de toename van de zoetwatervoorraad ruimtelijk weergegeven in dikte (meter). Deze toename kan worden gesommeerd tot een volumeontwikkeling in de tijd. Deze ontwikkeling is in figuur 12 weergegeven voor de autonome ontwikkeling en voor twee scenario's.



figuur 12: Berekende groei van de zoetwatervoorraad onder twee scenario's (boven) en de vermindering van die groei (de scenario's ten opzichte van de autonome ontwikkeling) (onder) voor respectievelijk Zuidelijk en Oostelijk Flevoland en de som van beiden

Uit figuur 12 blijkt dat de zoetwatervoorraad onder beide scenario's nog toeneemt. Tevens zijn in de deelfiguren grote verschillen tussen Zuidelijk en Oostelijk Flevoland zichtbaar. Het blijkt dat de toename van de zoetwatervoorraad vrijwel volledig is geconcentreerd in Oostelijk Flevoland, terwijl in Zuidelijk Flevoland onder het ruimste scenario de zoetwatervoorraad in Zuidelijk Flevoland zelfs iets zal krimpen. In tabel 2 is de ontwikkeling van de zoetwatervoorraad voor het totaal van Zuidelijk en Oostelijk Flevoland in cijfers gevat.

tabel 2: Voorraad en beïnvloeding van de voorraad (berekende gemiddelde waarden voor de komende 100 jaar) door de winscenario's, zoals beschreven in hoofdstuk 4

scenario	Jaarlijkse toename voorraad (Mm3/jr)	Jaarlijkse onttrekking (Mm3/jr)	Vermindering groei t.o.v. 'Autonoom' (Mm3/jr)	Aandeel voorraad in onttrekking (%)
Autonoom	15.5	0	0	0
Maximaal 3 cm	14.5	21	1	5
Maximaal 10 cm	10.5	62	5	8

Uit tabel 2 blijkt dat de toename van de voorraad significant vertraagt onder invloed van extra winningen, maar het stijghoogtecriterium blijkt in beide scenario's een strakker criterium te zijn dan het verziltings-

criterium. De maximale winning bij een verdrogingscriterium van 10 cm in het eerste watervoerend pakket onder natuurgebieden leidt tot een verminderde toename van het zoete water onder Flevoland met circa 500 Mm³ na 100 jaar (5 Mm³/jr). In die periode is dan meer dan het tienvoudige gewonnen, zodat 8% ten koste gaat van de voorraadontwikkeling. De maximale winning bij een verdrogingscriterium van 3 cm in het eerste watervoerend pakket onder natuurgebieden leidt tot een verminderde toename van het zoete water onder Flevoland met circa 100 Mm³ (1 Mm³/jr). In die periode is dan het twintigvoudige gewonnen, zodat 5% ten koste gaat van de voorraadontwikkeling. Bij een toename van de winning neemt het aandeel dat teert op de voorraadgroei dus toe, wat ook een indicatie vormt van de eindigheid van de winningsruimte onder Flevoland. Voor de huidige situatie en de nabije toekomst gaat de winning van zoet grondwater vooral ten koste van de kwel en leidt mogelijk tot iets meer toestroming van buiten de polder.

4 Optimalisatie winningsruimte

Op basis van de rekenresultaten van het wandelend pompstation is op een grid van 200 meter de verlaging van een winning in heel Flevoland bekend. Van meerdere winningen kan de verlaging worden opgeteld, volgens het superpositie-beginsel. Door middel van lineaire programmering kan onder deze voorwaarde de optimale configuratie worden bepaald van de winningen die voldoen aan het criterium voor stijghoogteverlaging in natuurgebieden. Het risico op verzilting van deze configuraties is vervolgens een niet-lineair proces en kan daarom niet integraal worden meegenomen in de optimalisatie procedure. Dit aspect wordt daarom op iteratieve wijze verdisconteerd:

- in de eerste ronde wordt de optimalisatie uitgevoerd voor de zone waar op basis van het verziltingscriterium minimaal 1 winning van de geteste omvang geplaatst zou kunnen worden, zoals begrensd in paragraaf 3.3
- deze configuratie van winningen wordt vervolgens doorgerekend, inclusief grensvlakverplaatsing
- indien dit leidt tot winlocaties die gevoelig zijn voor verzilting, dan worden die locaties verwijderd uit de zone waarbinnen geoptimaliseerd wordt en wordt de optimalisatie opnieuw uitgevoerd voor het aldus (kleiner) begrensde gebied
- deze toets wordt herhaald tot alle extra winningen gezamenlijk voldoen aan zowel het stijghoogte-criterium als het verziltingscriterium (geen verzilting).

Met deze methode worden de bestaande winningen niet beschermd tegen verzilting, zodat een berekende optimale configuratie toch tot verzilting van bestaande winningen kan leiden.

4.1 Verdrogingscriterium 3 cm

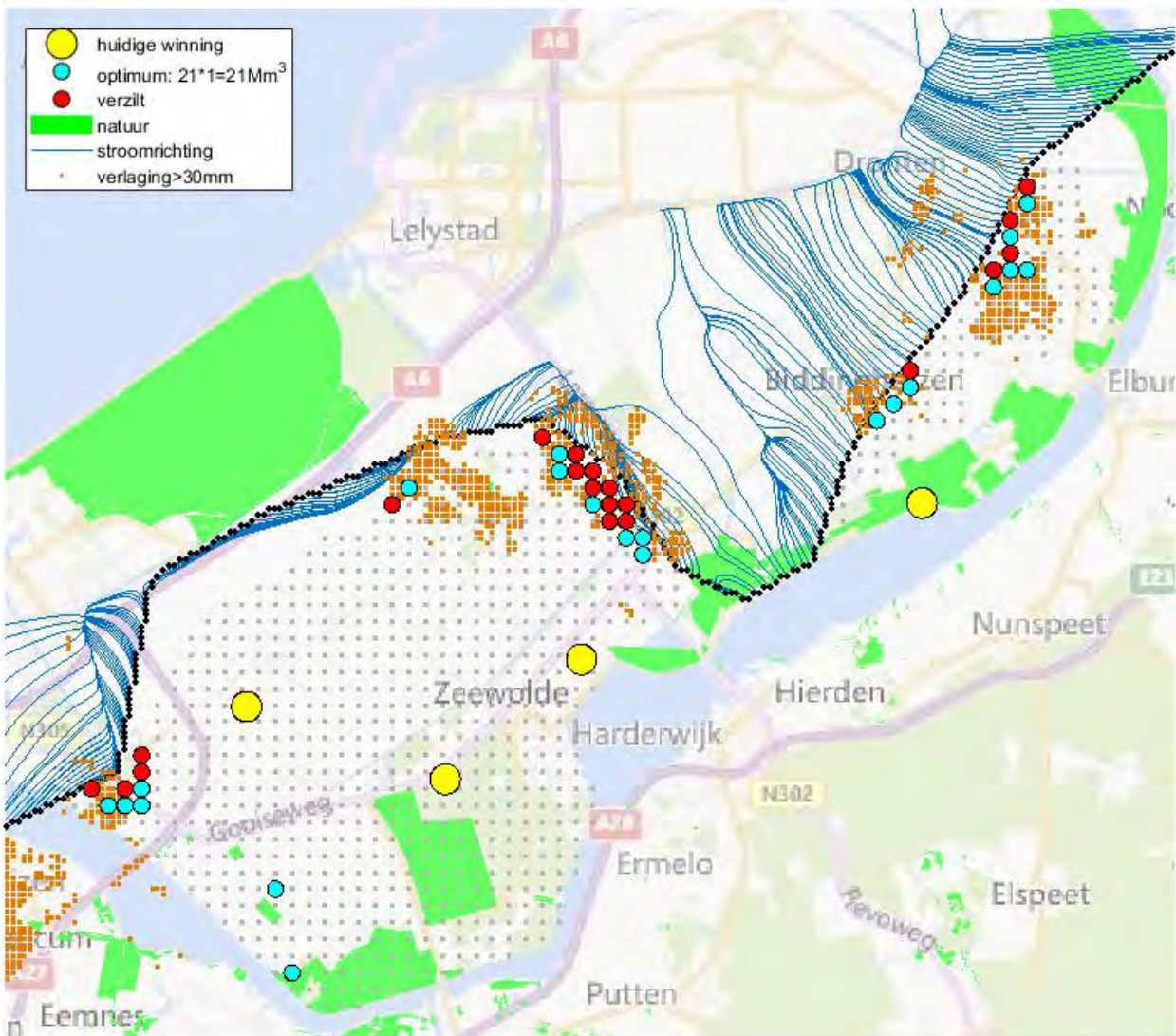
Het verdrogingscriterium van 3 cm legt aan de bijgeplaatste winningen de beperking op dat nergens onder een natuurgebied een verlaging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket van meer dan 3 cm mag optreden. Afhankelijk van de omvang van de bijgeplaatste winningen en de minimale onderlinge afstand verschilt het totaal aan bijplaatsbaar winvolume. In totaal is plaats voor 15 tot 20 Mm³/jr binnen Zuidelijk en Oostelijk Flevoland, waarvan een derde onder de boringsvrije zone. Indien de boringsvrije zone optimaal benut zou worden neemt de totale winbare hoeveelheid iets af, maar neemt het aandeel dat onder de boringsvrije zone kan worden geplaatst toe tot de helft van de totale winruimte (zie Bijlage 2).

In de volgende figuren (figuur 13 en figuur 14) zijn de optimale locaties en de maximaal plaatsbare extra winningen weergegeven. In de figuren zijn de wegens verzilting afgevallen winlocaties weergegeven om de risicozone voor verzilting zichtbaar te maken. Het aantal wegens verzilting afgevallen locaties geeft het aantal iteraties weer, dat doorlopen moest worden om de optimale verdeling van de extra winningen te bepalen die niet verzilten en wel voldoen aan het stijghoogte-beïnvloedingscriterium.

Uit de figuren blijkt dat in Oostelijk Flevoland de optimale ruimte zich vlak langs het grensvlak uitstrekt. In Zuidelijk Flevoland ligt de optimale ruimte aan de zuidwestelijke rand van de boringsvrije zone en in een cluster langs het noordelijk deel van het grensvlak. In die zin worden op basis van deze criteria relatief kwetsbare posities geselecteerd. Keuze voor robuustere locaties, verder van het grensvlak en dus hoger (stroomopwaarts) in het hydrologische systeem kunnen wel de grootste winningen worden geplaatst, maar

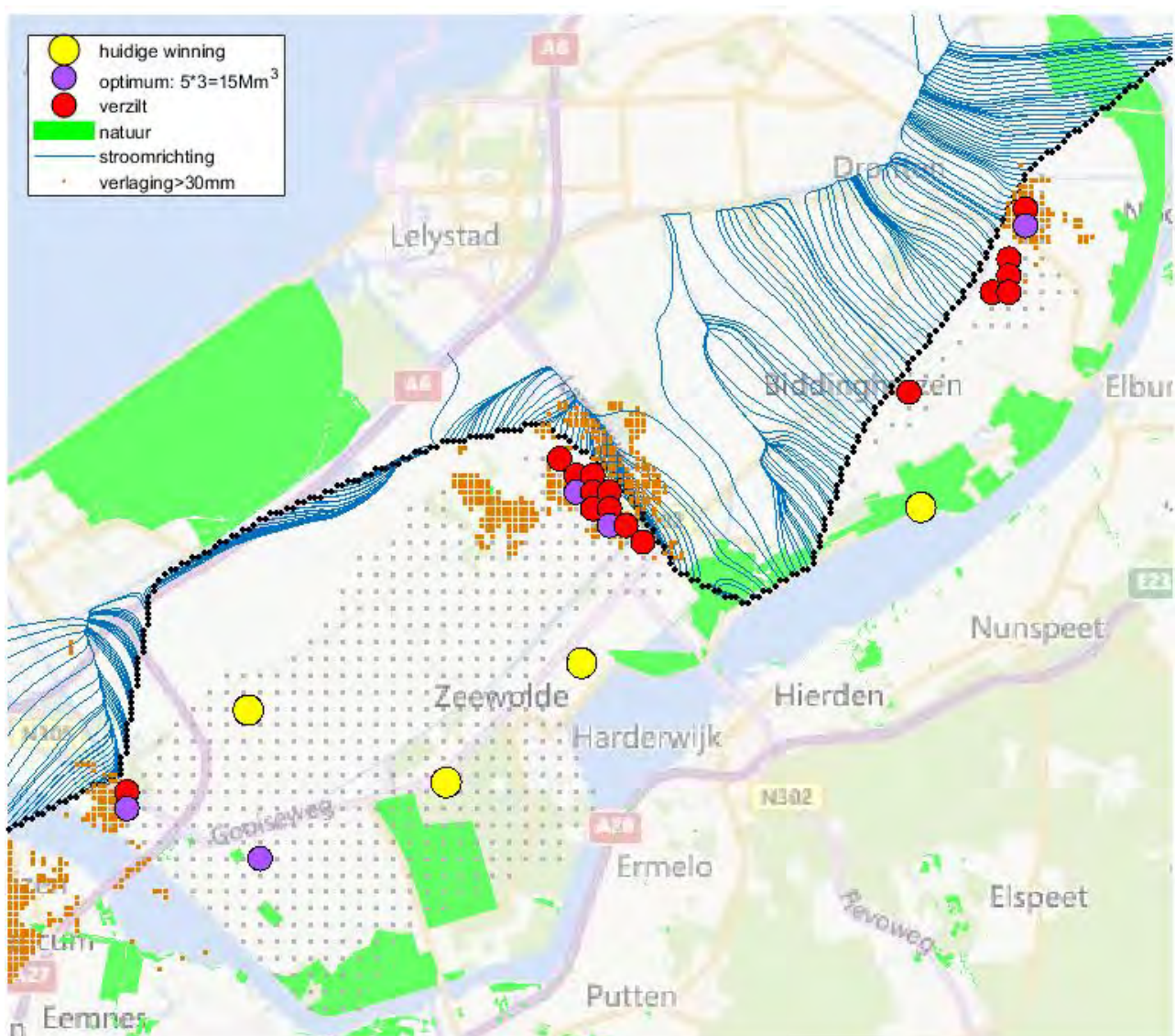
dat gaat ten koste van het totale winbare volume, omdat de effecten minder goed lokaal gedoseerd kunnen worden.

In Bijlage 1 zijn de optimalisatie resultaten opgenomen indien op een finer of grover grid de minimale afstand tussen winningen wordt gevarieerde. Hieruit blijkt dat de resultaten sterk vergelijkbaar zijn.



figuur 13: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 21 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter



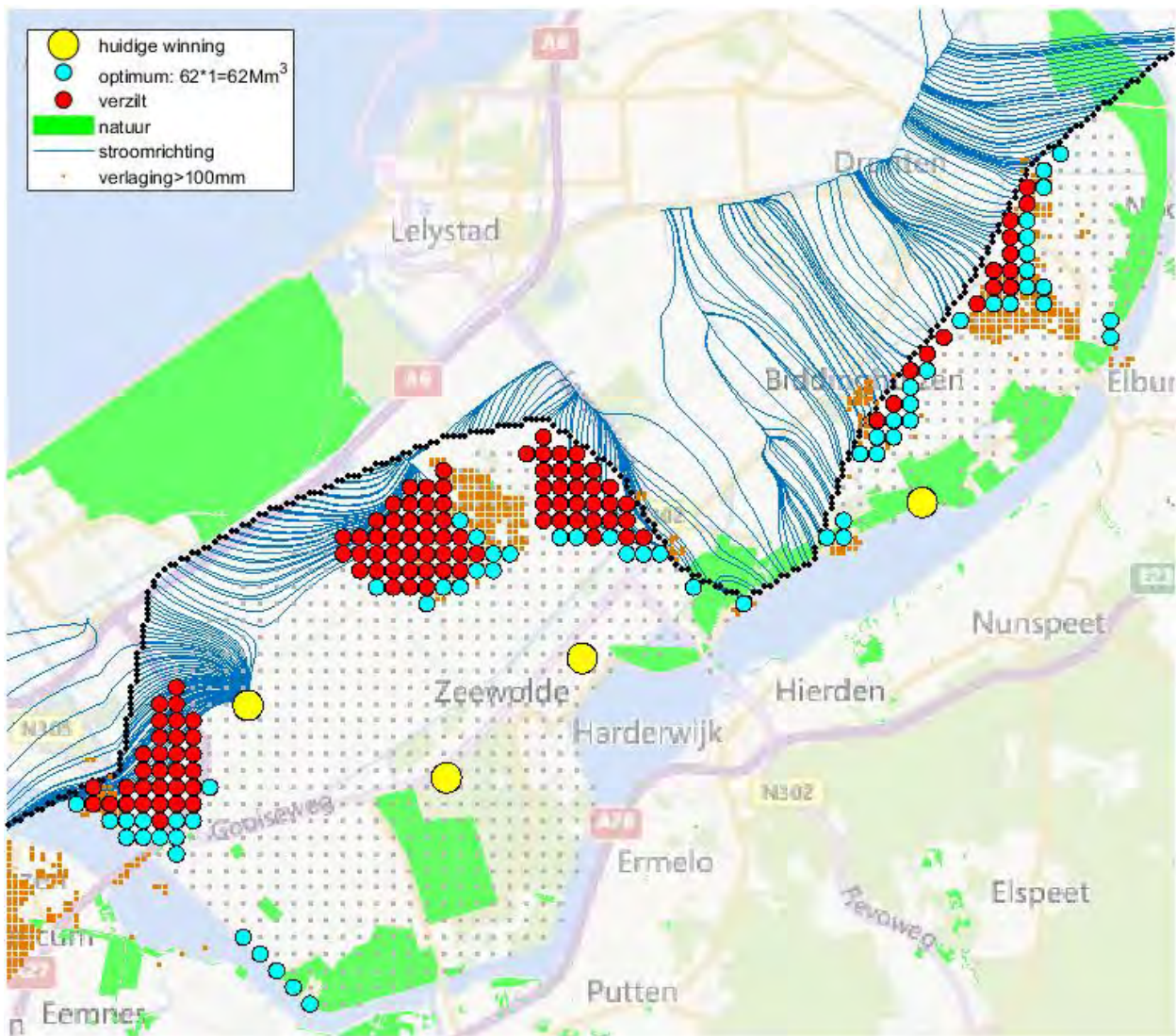
figuur 14: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 15 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter

4.2 Verdrogingscriterium 10 cm

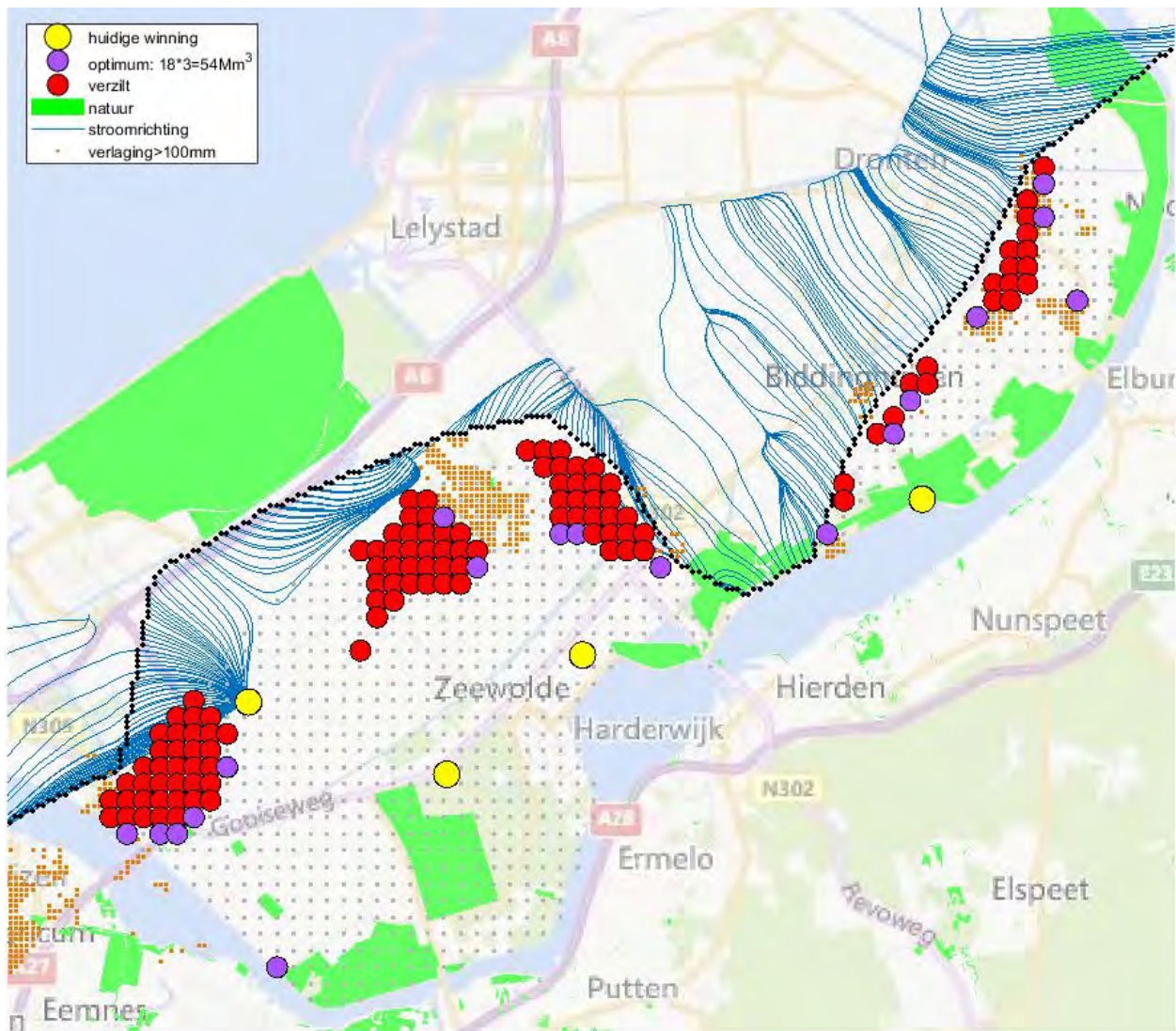
Het verdrogingscriterium van 10 cm legt aan de bijgeplaatste winningen de beperking op dat nergens onder een natuurgebied een verlaging van de stijghoogte in het eerste watervoerende pakket van meer dan 10 cm mag optreden. Afhankelijk van de omvang van de bijgeplaatste winningen en de minimale onderlinge afstand verschilt het totaal aan bijplaatsbaar winvolume. In totaal is er plaats voor 50–60 Mm³/jr binnen Zuidelijk en Oostelijk Flevoland, waarvan circa de helft onder de boringsvrije zone. Ten gevolge van deze winning zal de winning Spietzand verzilt, zodat deze hoeveelheid (5 Mm³/jr) in mindering komt op het totaal. In de volgende figuren (figuur 15 en figuur 16) zijn de optimale locaties en de maximaal plaatsbare extra winning weergegeven.

Uit de figuren blijkt dat bij dit verdrogingscriterium de optimale verdeling (bij maximale benutting) hetzelfde patroon volgen als bij het 3 cm criterium. De afstand tot het zoet-zout grensvlak neemt alleen iets toe, omdat de totale toelaatbare extra grondwaterwinning ongeveer verdrievoudigt.



figuur 15: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 62 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter



figuur 16: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 54 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter

5 Kwetsbaarheid winning uit diep grondwater

De kwetsbaarheid van een grondwaterwinning uit het diepe grondwater (Formatie van Peize/Waalre) wordt enerzijds bepaald door de hydrologische configuratie en anderzijds door de potentiële- en historische belasting in het intrekgebied. Dit laatste aspect van de kwetsbaarheid is afhankelijk van landgebruik, bedrijvigheid en kans op calamiteiten. In deze studie beperken we ons tot de hydrologische kwetsbaarheid van het grondwater. Deze wordt uitgedrukt in de leeftijdsverdeling van het onttrokken water van een virtuele winning op een specifieke locatie. Via een wandelend pompstation wordt een gebiedsdekkende impressie van de kwetsbaarheid opgesteld.

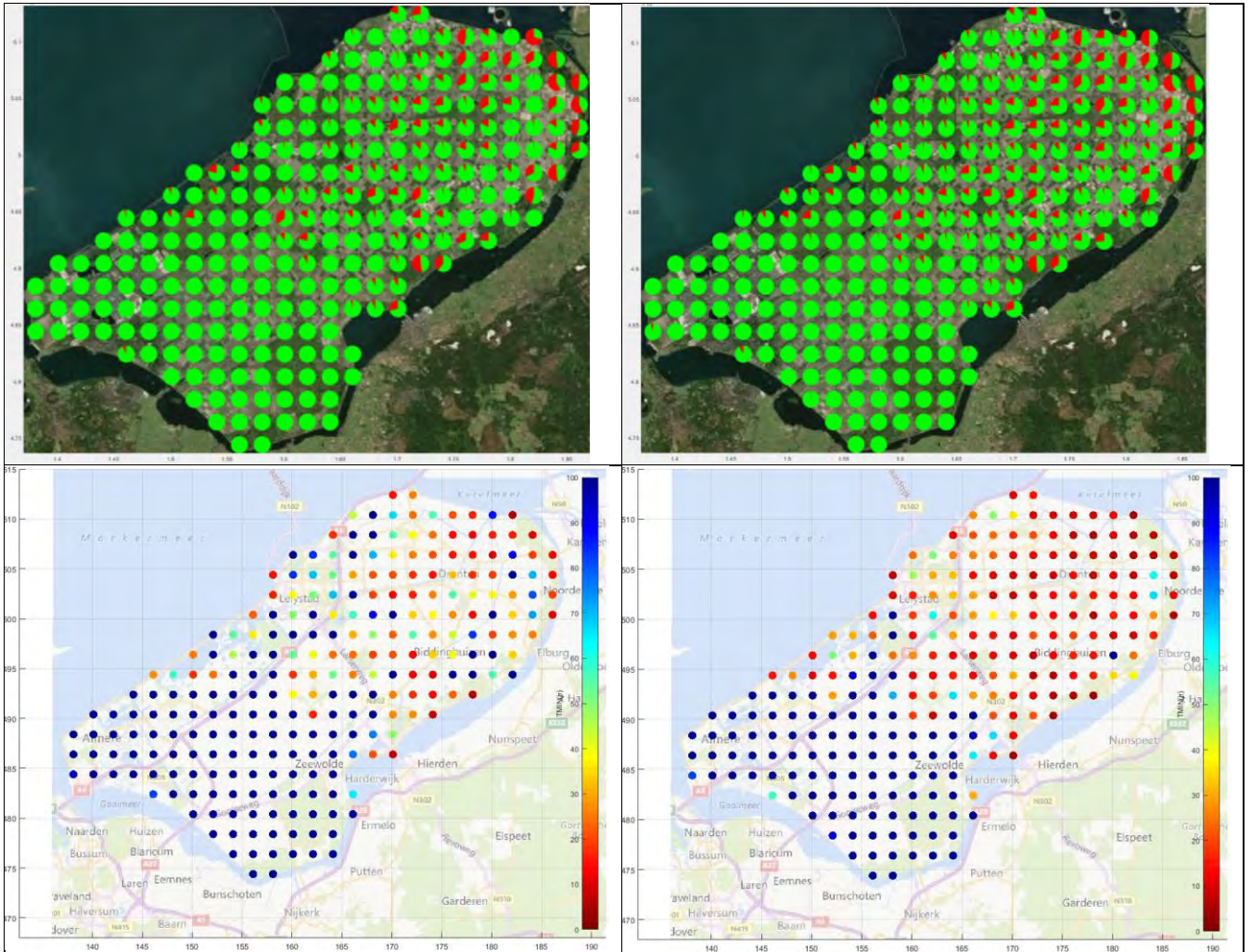
De hydrologische kwetsbaarheid wordt voor een deel bepaald door de intensiteit van de interactie tussen grond en oppervlaktewater, oftewel door de bodemweerstand van het open water. In zones met een sterke permanente kwel is de kwetsbaarheid van het grondwater relatief klein ten opzichte van zones met inzijging. In die zin vormen de Randmeren een speciale categorie: binnen de Randmeren is vaak sprake van een overgangszone, waarin zowel kwel als wegzijging optreedt. De Randmeren zijn in deze studie met een relatief geringe weerstand geschematiseerd, omdat de grootte van deze weerstand onzeker is en bovendien door bagger- en graafwerkzaamheden in de loop van de tijd kan veranderen. Daarmee wordt de kwetsbaarheid van winningen langs de randmeren niet onderschat.

Naast de variaties binnen de toplaag speelt de verbreiding van de diepere kleiafzettingen onder Flevoland een belangrijke rol in het onderscheid tussen kwetsbare winlocaties en zeer goed beschermde winlocaties. De boringsvrije zone markeert in Zuidelijk Flevoland het gebied met een hoge mate van deze geohydrologische bescherming, terwijl onder Oostelijk Flevoland dergelijke robuuste ononderbroken kleilagen niet voorkomen en winningen dus kwetsbaarder zijn voor recente verontreinigingen.

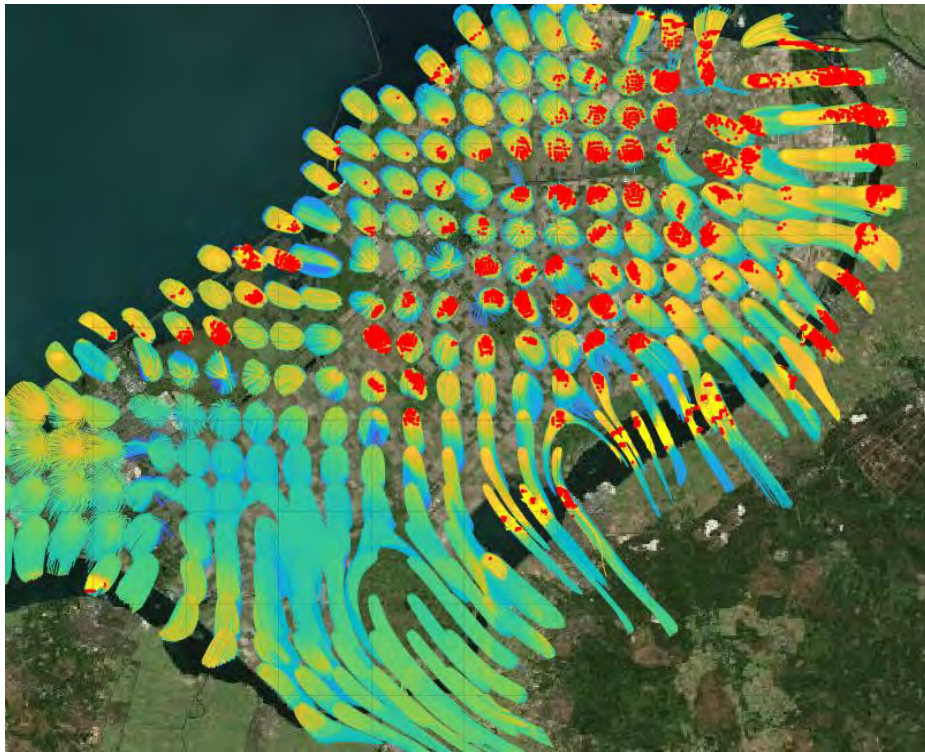
5.1 Kwetsbaarheid van winningen

De kwetsbaarheid wordt berekend als het percentage van het onttrokken water uit een put geplaatst in het diepe pakket (zanden van Peize/Waalre, zie Bijlage 3) met een verblijftijd van minder dan 100 jaar, gerekend vanaf maaiveld. Hierin is dus de antropogene geschiedenis van de polder deels inbegrepen, met circa vijftig jaar landbouwkundig gebruik (voorzover stroomlijnen in de polder starten). Met twee onttrekkingsniveaus (resp. 1 en 3 Mm³/jr) is de invloed op de kwetsbaarheid voor de grootte van de winning in beeld gebracht. Uit figuur 17 blijkt dat de gevoeligheid voor de omvang van de winning niet heel groot is. Winningen onder de boringsvrije zone onttrekken geen jong water, terwijl winningen in Oostelijk Flevoland over het algemeen een aanzienlijk aandeel recent geïnfiltreerd water afvangen. In figuur 18 is inzichtelijk gemaakt welke afstand en op welke diepte de stroomlijnen de laatste 100 jaar tot de winning afleggen. De volgende patronen zijn te zien:

- Onder de boringsvrije zone in Zuidelijk Flevoland blijven de stroomlijnen diep onder de Eemklei. Zeker aan de rand leggen deze stroomlijnen een grote afstand af, onder invloed van de gradiënt vanaf de Veluwe.
- De toestroming naar putten in Oostelijk Flevoland varieert sterk:
 - in het centrum van de polder is de toestroming lokaal
 - uit de Randmeren infiltreren stroomlijnen maar duiken er ook deels onder door
- Rondom Zuidelijk en Oostelijk Flevoland vormt infiltratie buiten de polderranden een belangrijke voeding voor kwel in de polder



figuur 17: kwetsbaarheid als aandeel van het onttrokken water in een winning van respectievelijk 1 (links) en 3 Mm³/jr jonger dan 100 jr, aangeduid door het rode part (boven) en de kortste verblijftijd op de verschillende locaties (onder)



figuur 18: Route laatste 100 jaar van de stroomlijnen (winningen van 1 Mm³/jr), waarbij de kleur de diepte aangeeft. De infiltratiepunten zijn met rood aangeduid.

6 Conclusies

Met deze studie is de winningsruimte van grondwater onder Flevoland afgetast, waarbij rekening is gehouden met de impact op verdroging, de risico's op verzilting en de zorg om het behoud van de zoetwatervoorraad. Tevens is gekeken naar de gevolgen van grondwaterwinning in Utrecht en Gelderland op de winningsruimte in Flevoland. Daarnaast is de winningsruimte gekwalificeerd op kwetsbaarheid voor antropogene verontreiniging.

De studie is gebaseerd op regionale modelberekeningen. Daarbij is het AZURE-grondwatermodel als basis gebruikt. Om het model geschikt te maken voor dichtheidafhankelijke grensvlakberekening, is de code omgezet in standaard MODFLOW en aangevuld met de SWI-package.

6.1 Verdrogingsrisico

Uit de modelmatige exercitie zijn de volgende conclusies te trekken ten aanzien van het verdrogingsrisico:

1. De doorwerking naar de stijghoogte in het ondiepe grondwater van winningen in Zuidelijk Flevoland is relatief gering. De doorwerking manifesteert zich vooral aan de randen van de Eemklei. Deze randen vallen echter vaak samen met kwetsbare natuurgebieden, waardoor er toch relatief nauwe grenzen zijn aan de exploitbaarheid van dit grondwater zonder nadelige natuurimplicaties.
2. De doorwerking naar het ondiepe grondwater in Oostelijk Flevoland is relatief groot, maar de invloedszone van een winning is hier relatief klein. Omdat in het centrum van Oostelijk Flevoland geen kwetsbare natuur is gedefinieerd, is het mogelijk om hier relatief veel te winnen zonder conflict met de natuurgebieden die aan de rand van de polder zijn gesitueerd.

6.2 Verziltingsrisico's

Voor de risico's op verzilting gelden andere gevoeligheden. Uit de modelmatige exercitie zijn de volgende conclusies te trekken ten aanzien van het verziltingsrisico:

1. Het risico op het aantrekken van brakwater in Zuidelijk Flevoland in een bredere zone zal optreden dan in Oostelijk Flevoland.
2. In Oostelijk Flevoland kan tot vrij dicht tegen het zoet~zout grensvlak zonder verziltingsrisico worden gewonnen. De zoetwater-zone (langs de rand die aan het oude land grenst) is echter vrij smal, zodat de totale ruimte zonder verziltingsrisico toch aanzienlijk kleiner is dan in Zuidelijk Flevoland.
3. De ligging van het grensvlak in Oostelijk Flevoland is nog lang niet in evenwicht en beweegt onder invloed van de stijghoogte gradiënt in de richting van het centrum van de polder. Dit vergroot de mogelijkheden om tot dicht langs het grensvlak zonder verziltingsrisico zoet grondwater te winnen, zeker met kleinere winningen.
4. De winning Spiekzand al snel in de gevarenzone kan komen te liggen indien elders in Zuidelijk Flevoland extra winning wordt toegestaan.

6.3 Exploitatieruimte zoet grondwater

Door combinatie van de beide aspecten (voorkomen van verdroging en verzilting) blijkt de totale extra winbare hoeveelheid in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland vrij beperkt:

1. Bij een criterium van maximaal 3 cm toelaatbare verlaging in het eerste watervoerende pakket onder natuurgebieden gelden de volgende karakteristieken van de rest-ruimte:

- a. Er is binnen Zuidelijk en Oostelijk Flevoland nergens plaats voor een grote extra winning van meer dan 10 Mm³/jr.
 - b. Voor een aantal configuraties met kleinere winningen is meer plaatsingsruimte. De maximale plaatsingsruimte voor dergelijke winningen bedraagt 15 tot 20 Mm³/jr
 - c. Bij uitbreiding van Holk en Eemdijk vervalt de gehele ruimte voor extra winning in Zuidelijk Flevoland
2. Bij een criterium van 10 cm verlaging in het eerste watervoerende pakket onder kwetsbare natuurgebieden gelden de volgende karakteristieken voor de restruimte:
 - a. In dat geval zijn er binnen Zuidelijk Flevoland nog wel mogelijkheden om maximaal 2 extra winningen van 10 Mm³/jr te plaatsen.
 - b. Ook in Oostelijk Flevoland zou een winning van 10 Mm³/jr in principe nog kunnen worden ingepast.
 - c. Configuraties met kleinere winningen kunnen de plaatsingsruimte beter benutten. De maximale plaatsingsruimte voor dergelijke winningen bedraagt 45 tot 55 Mm³/jr
 - d. Bij uitbreiding van Holk en Eemdijk vervalt de ruimte voor extra winningen in Zuidelijk Flevoland
 3. De maximale capaciteit wordt alleen gehaald, indien de extra winningen geplaatst worden aan de randen van de zoetwaterzone. Met name plaatsing van winningen in het centrum van de boringsvrije zone leidt tot een sterke reductie van de totale exploitatieruimte, gegeven de criteria ten aanzien van verdroging.
 4. Ook bij maximale exploitatie binnen de gestelde criteria, kan de zoetwatervoorraad nog toenemen: de opgelegde verdrogingscriteria zijn beperkender dan het verziltingscriterium. In Zuidelijk Flevoland is de zoetwatervoorraad momenteel reeds vrijwel stabiel en kan onder het ruimste verdrogingscriterium zelfs iets krimpen.

6.4 Kwetsbaarheid winningen

De kwetsbaarheid van de winningen is in deze studie gedefinieerd als het aandeel van het onttrokken water met een maximale verblijftijd van 100 jaar, zoals berekend met een wandelend pompstation, gesuperponeerd op de huidige situatie.

In Zuidelijk Flevoland is er een duidelijke ruimtelijke verdeling van de kwetsbaarheid, waarbij de winningen langs de randen buiten de boringsvrije zone kwetsbaar zijn, terwijl de winning binnen de boringsvrije zone goed beschermd is. Deze verdeling valt op gunstige wijze vrijwel samen met de verdeling van zoet en brak grondwater. Ook geeft deze verdeling weinig conflicten met natuurgebieden.

Oostelijk Flevoland is in zijn geheel kwetsbaar voor recente verontreinigingen. Dit geldt voor het brakke deel in sterke mate voor het centrum van de polder en in mindere mate voor de IJsselmeer oeverzone. Maar ook de gebieden met zoet grondwater langs het Drontermeer en het Veluwemeer en in de Knardijkzone, zijn kwetsbaar.

In combinatie met de verdrogingsrisico's en de verziltingsrisico's biedt de winning van zoet grondwater onder de bestaande boringsvrije zone in Zuidelijk Flevoland de meest aantrekkelijke grondstof voor de drinkwatervoorziening: duurzaam betrouwbaar. De capaciteit voldoet voor het huidige verbruik en biedt nog enige ruimte voor verruiming van de winning. De capaciteit is echter zeker niet grenzeloos en nadert zijn maximale duurzame exploitatiegraad.

6.5 Reikwijdte conclusies

De studie is zoals gesteld een modeloefening. Aan de studie kleven dus de onzekerheden die samenhangen met voorspellingen met behulp van een grondwatermodel en de nauwkeurigheid van de schematisatie van de zoet-zout verdeling. De studie geeft door het inbrengen van de relevante processen (invloed dichtheidsverschillen op verziltingsrisico's en het rekenen met grensvlakken) wel een realistische inschatting van de gevoeligheden van het grondwatersysteem, voor verdere exploitatie.

Naar de aard van het detail van het model en door de gevoeligheden voor lokale omstandigheden, vervangt deze studie zeker geen locatiestudies bij het feitelijk toestaan van nieuwe winlocaties noch voor het verhogen van bestaande vergunningen. Daartoe zouden de volgende zaken nader moeten worden onderzocht:

- een nadere kalibratie van het model
- de risico's van upconing van dieper grondwater
- de gevoeligheid van de schematisatie voor de verdeling van watertypen
- de invloed van de winning op het verziltingsrisico van bestaande winningen
- de invloed van de winning op de resterende ruimte
- de feitelijke verbreiding van verontreinigingen binnen het intrekgebied
- de bodemopbouw, in het licht van zettingsrisico's
- de verwachte invloed van een winning op natuurwaarden, ook in relatie tot de lokale bodemopbouw

Literatuur

Bakker, M., F. Schaars, J. Hughes, C. Langevin, en A. M. Dausman. *Documentation of the Seawater Intrusion (SWI2) Package for MODFLOW: Techniques and Methods*. Vol. book 6, chap. A46, 99 p. Reston, VA: U.S. Geological Survey., 2013.

Beekman, W., F.W. Schaars, J.H. Peters, M.J.C. van Baar, en A.A. Kooistra. *Winning van zoet grondwater in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland*. Schoonhoven: Artesia, 2004.

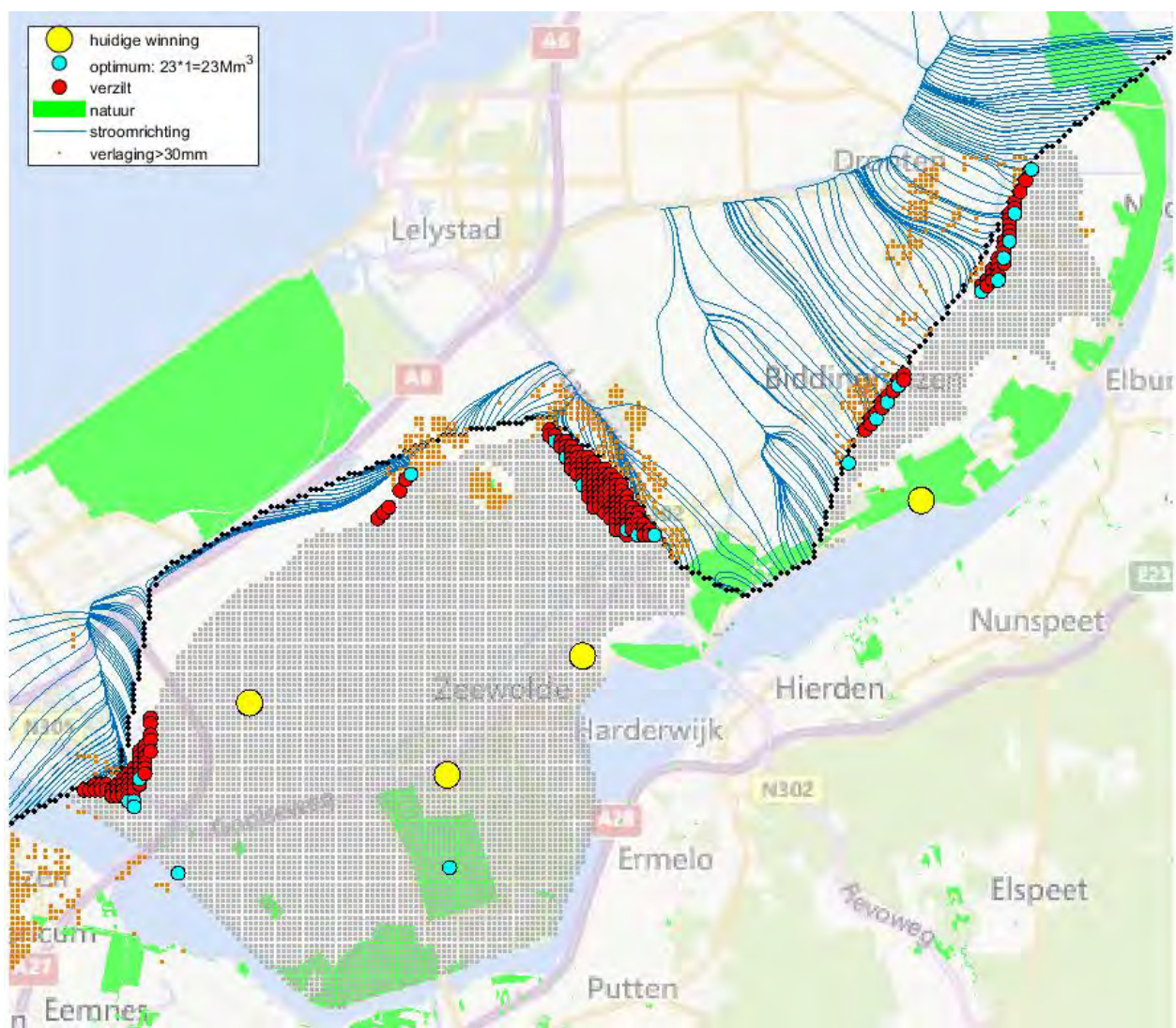
Essink, Gualbert Oude, Perry de Louw, Michelle van Vliet, en e.a. *Zoet-zout studie Provincie Flevoland*. Utrecht: Deltares, 2008.

Bijlage 1 Optimale verdeling

In deze bijlage zijn de resultaten weergegeven van de optimalisatie van configuraties die een maximale benutting van het diepe grondwater in Zuidelijk en Oostelijk Flevoland opleveren onder een aantal beperkende randvoorwaarden:

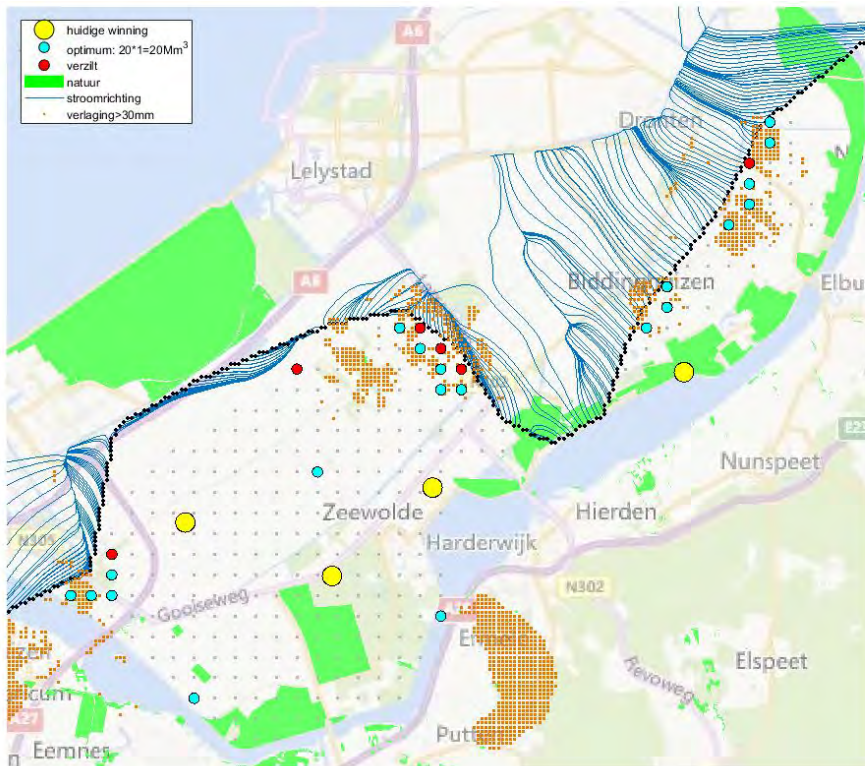
- De minimale onderlinge afstand
- De omvang van de winning per geselecteerde locatie
- De maximaal toelaatbare verdroging onder verdrogingsgevoelige natuurgebieden
- Geen verzilting van de toegevoegde winlocaties

Bij elke figuur staan de randvoorwaarden in het bijschrift en de resulterende maximale onttrekking in de legenda en het bijschrift. Zie ook hoofdstuk 4 voor verdere toelichting,.



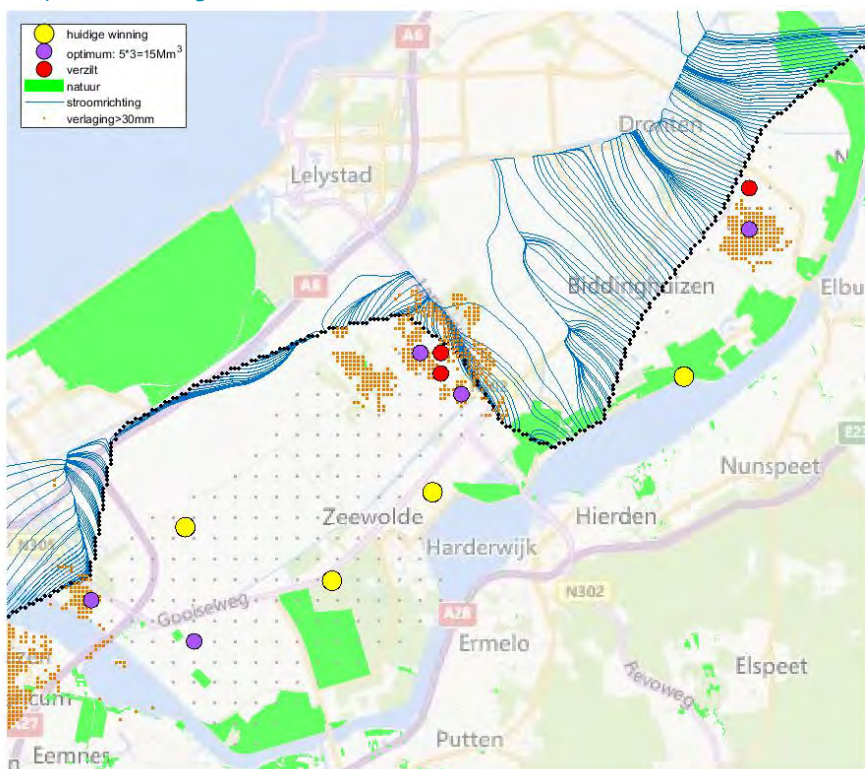
figuur 19: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 23 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 200 meter



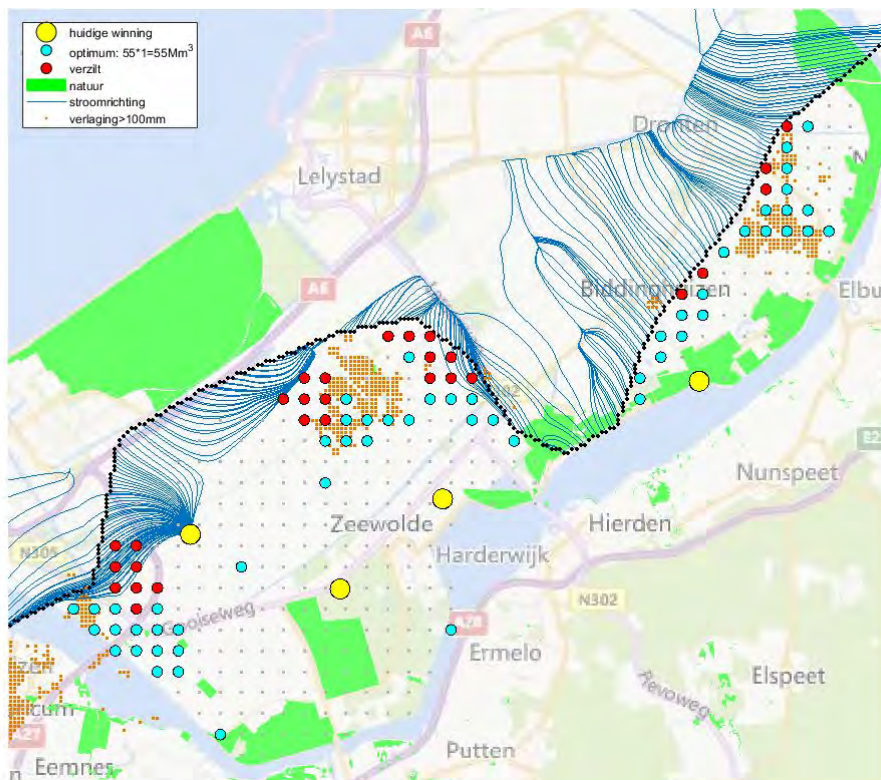
figuur 20: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 20 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter



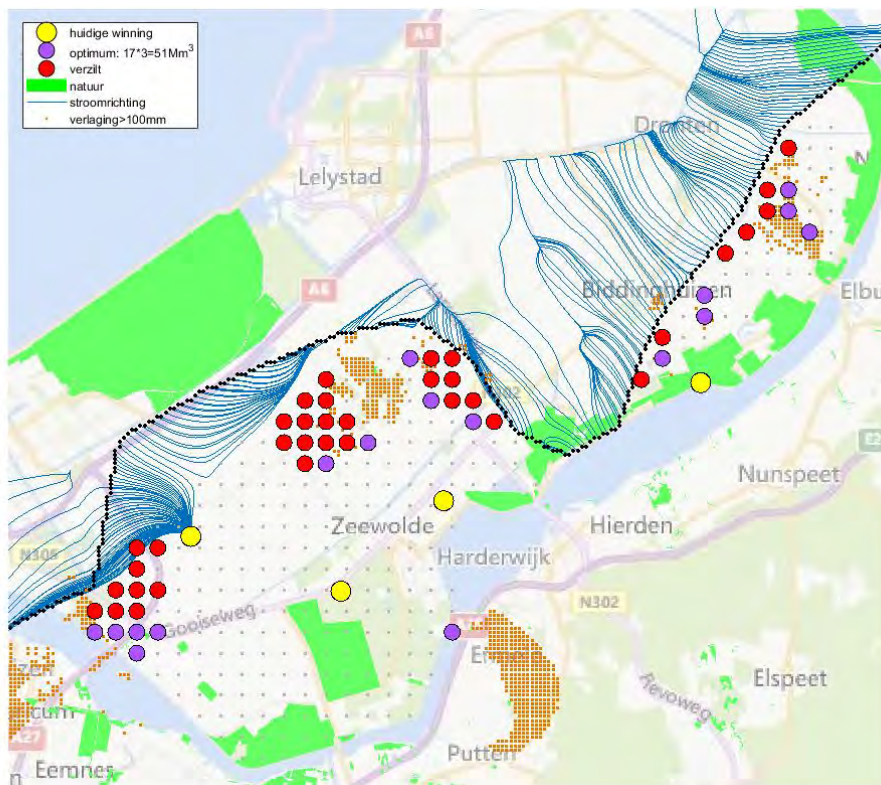
figuur 21: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 15 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter



figuur 22: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 55 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter

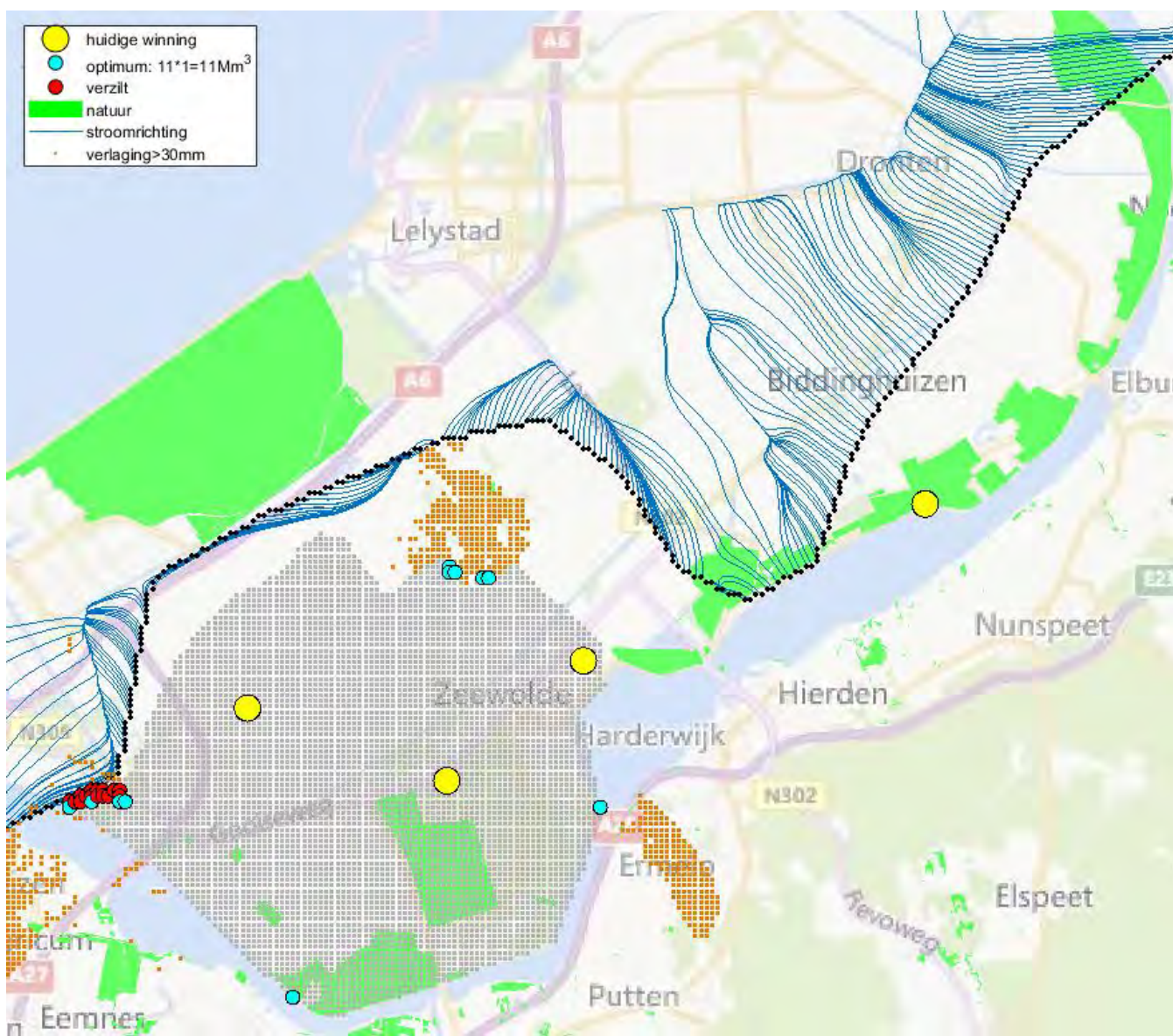


figuur 23: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 51 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10 cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter

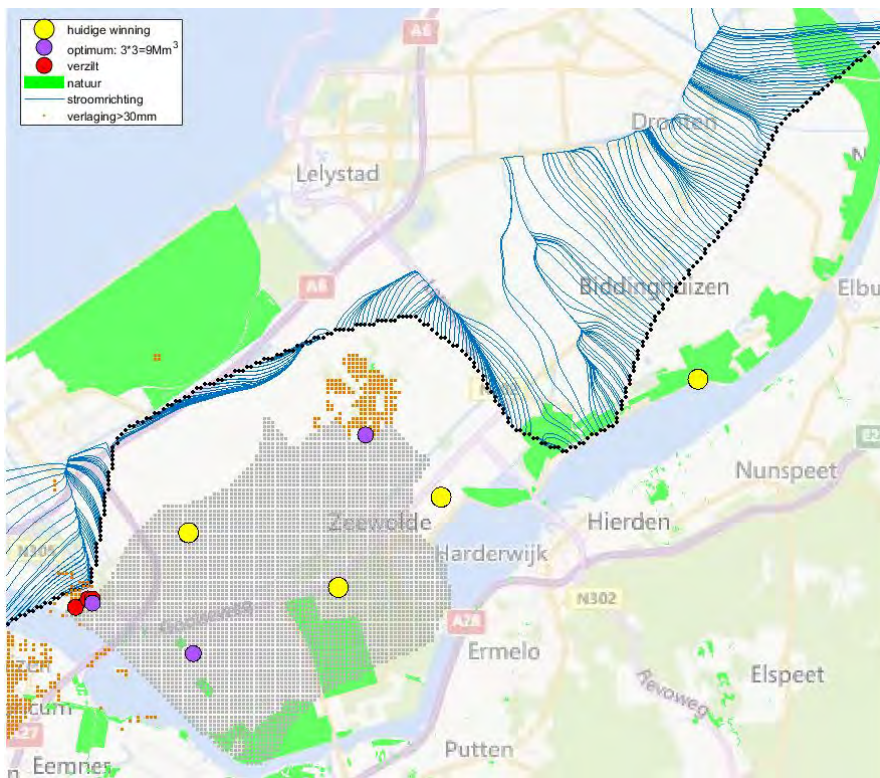
Bijlage 2 Optimale verdeling in boringsvrije zone

In deze bijlage zijn de resultaten weergegeven van de optimalisatie van configuraties die een maximale benutting van het diepe grondwater onder de boringsvrije zone opleveren. In deze berekening zijn geen potentiële winlocaties in Oostelijk Flevoland meegenomen (behalve de bestaande winning Bremerberg). De resultaten worden weer per combinatie van randvoorwaarden weergegeven, zoals telkens in de bijschriften staan vermeld.



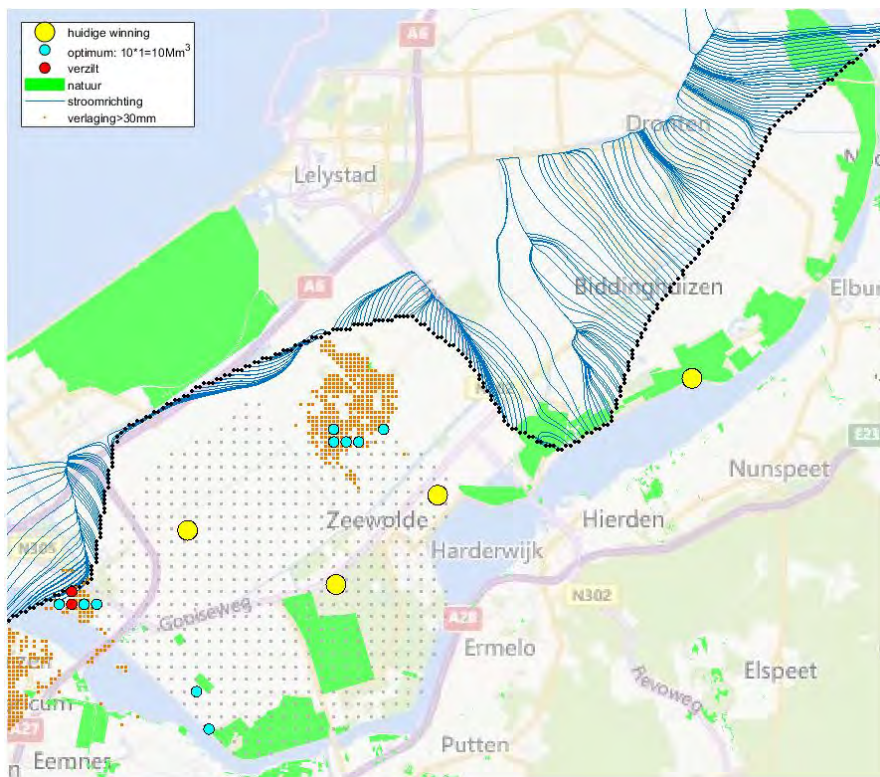
figuur 24: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal $11 \text{ Mm}^3/\text{jr}$) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van $1 \text{ Mm}^3/\text{jr}$
- op een onderlinge afstand van minimaal 200 meter



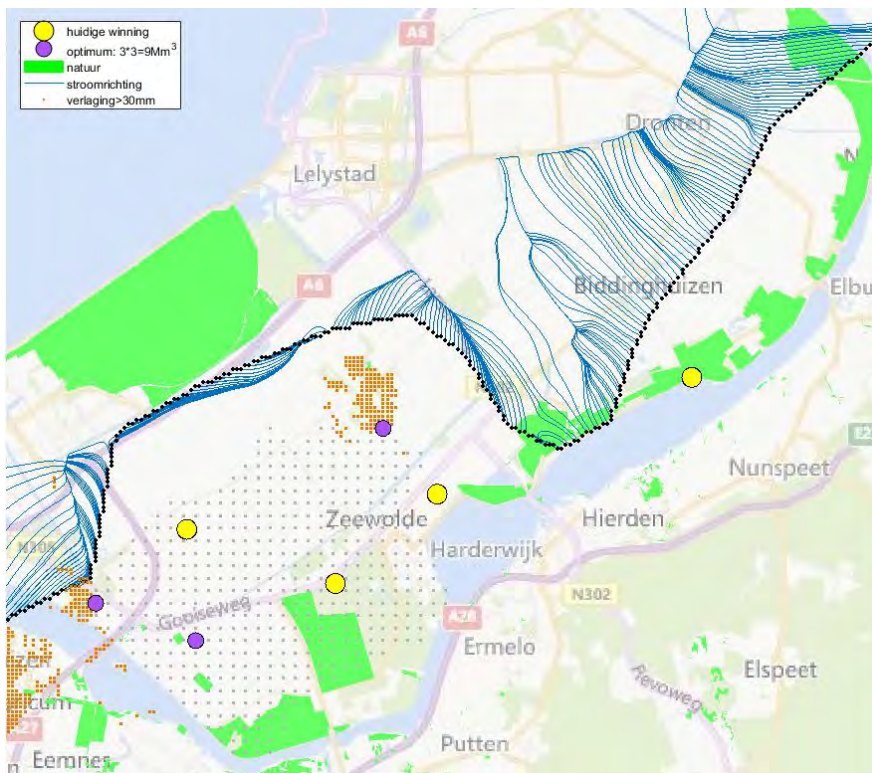
figuur 25: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 9 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 200 meter



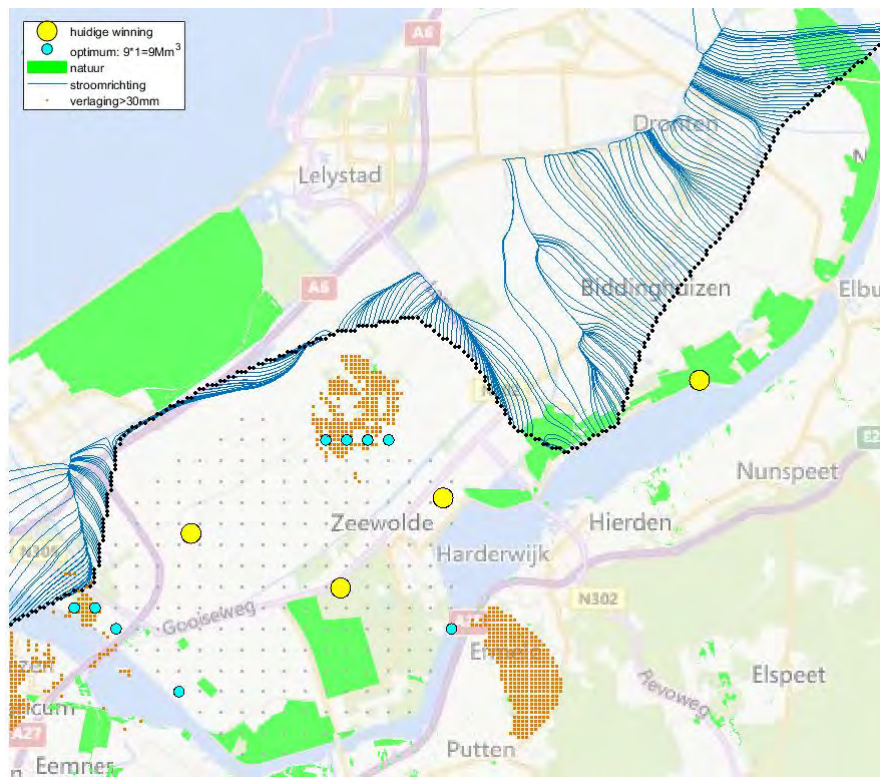
figuur 26: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 10 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter



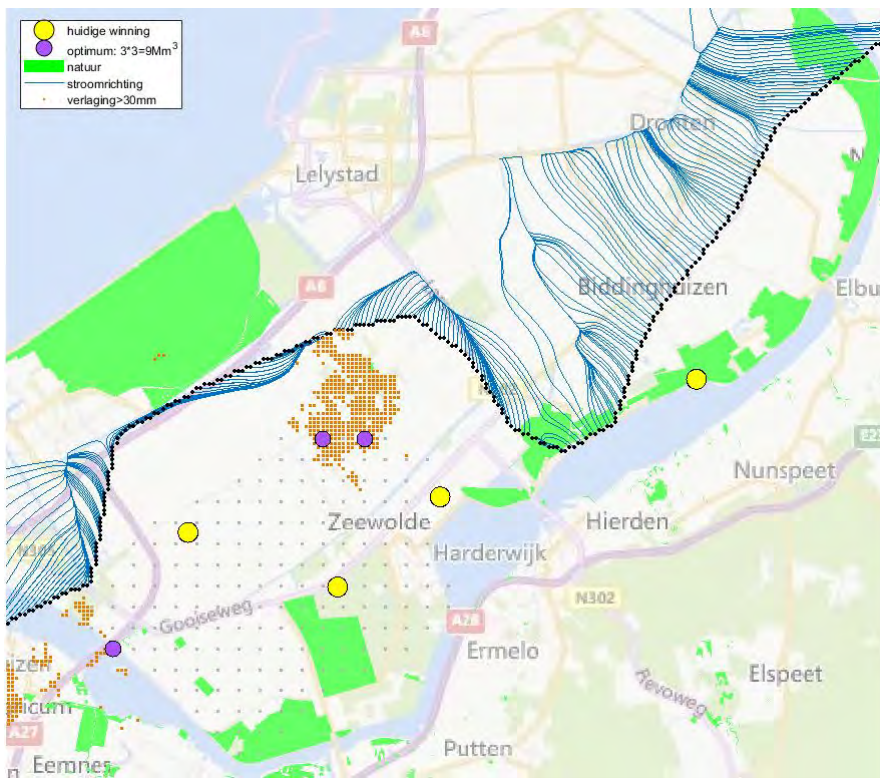
figuur 27: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 9 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter



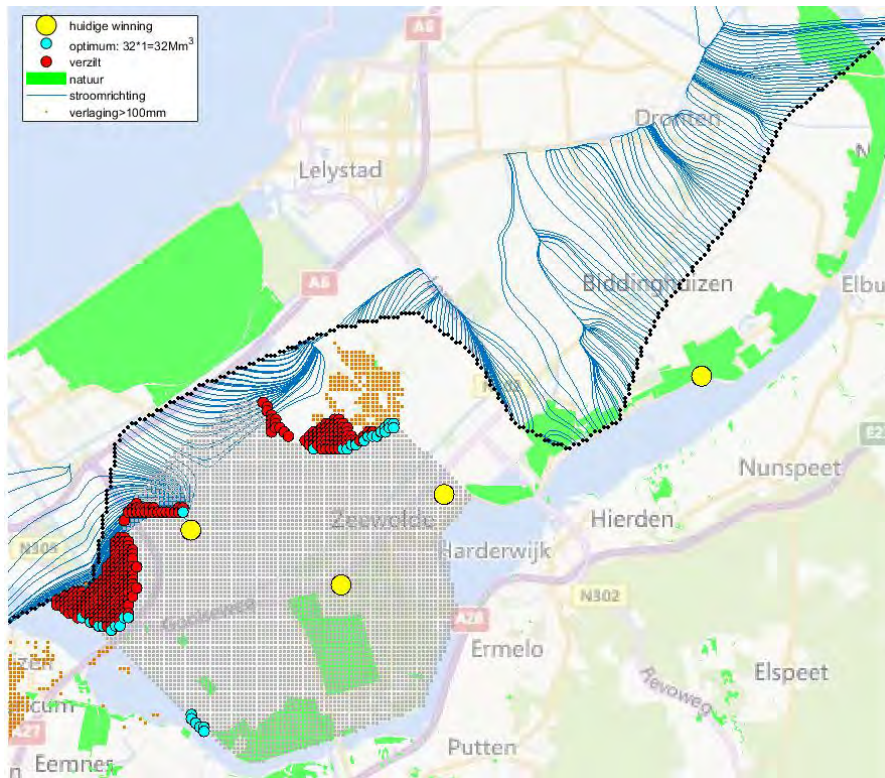
figuur 28: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 9 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter



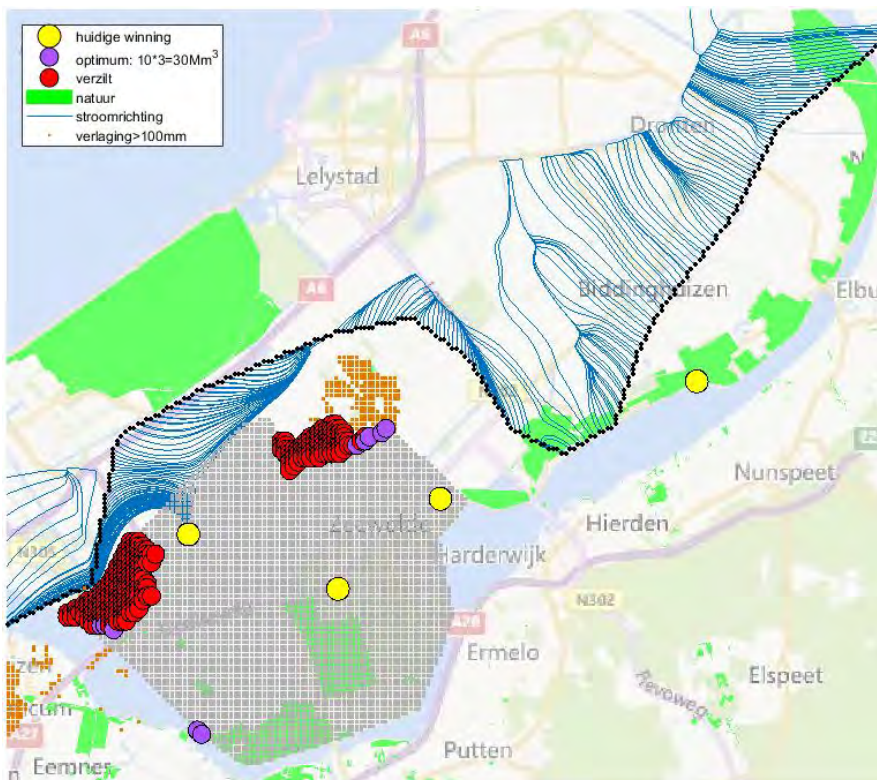
figuur 29: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 9 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 3cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter



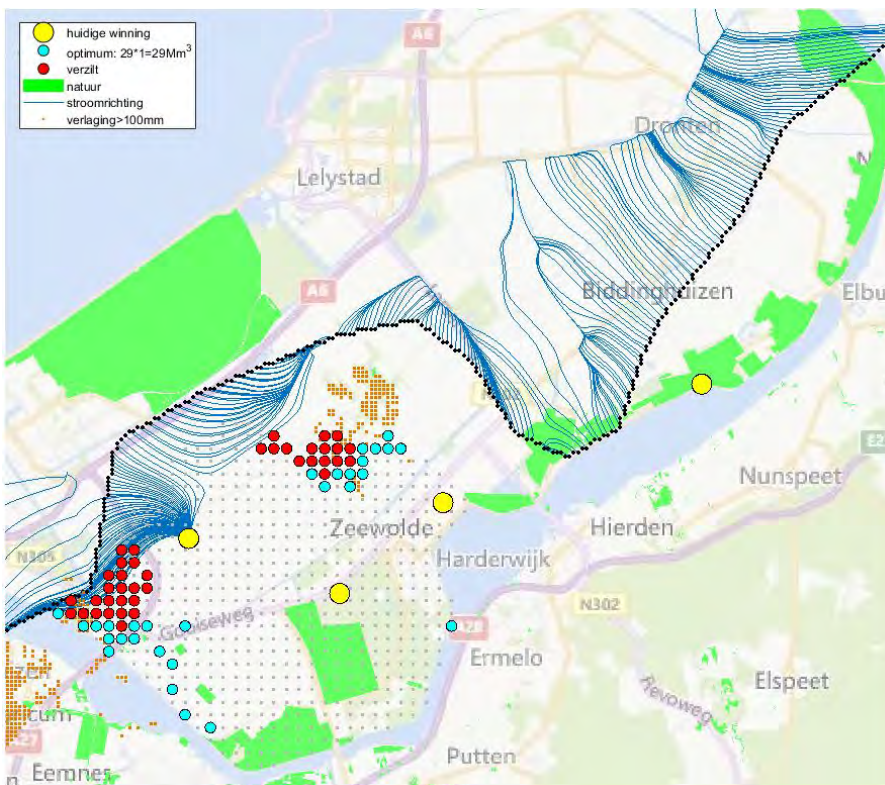
figuur 30: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 32 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 200 meter



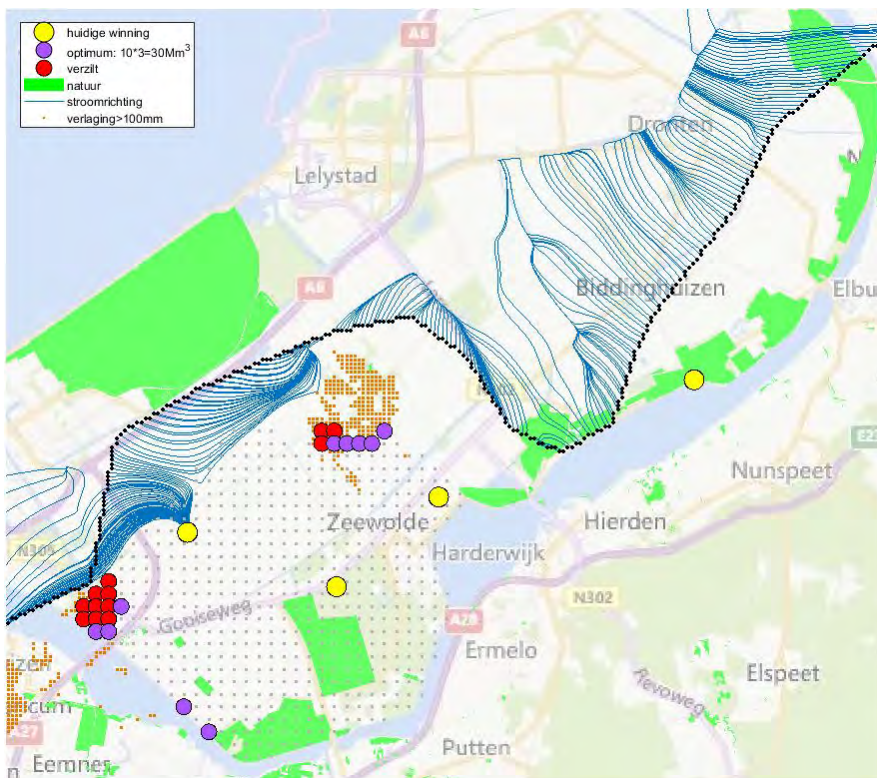
figuur 31: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 30 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 200 meter



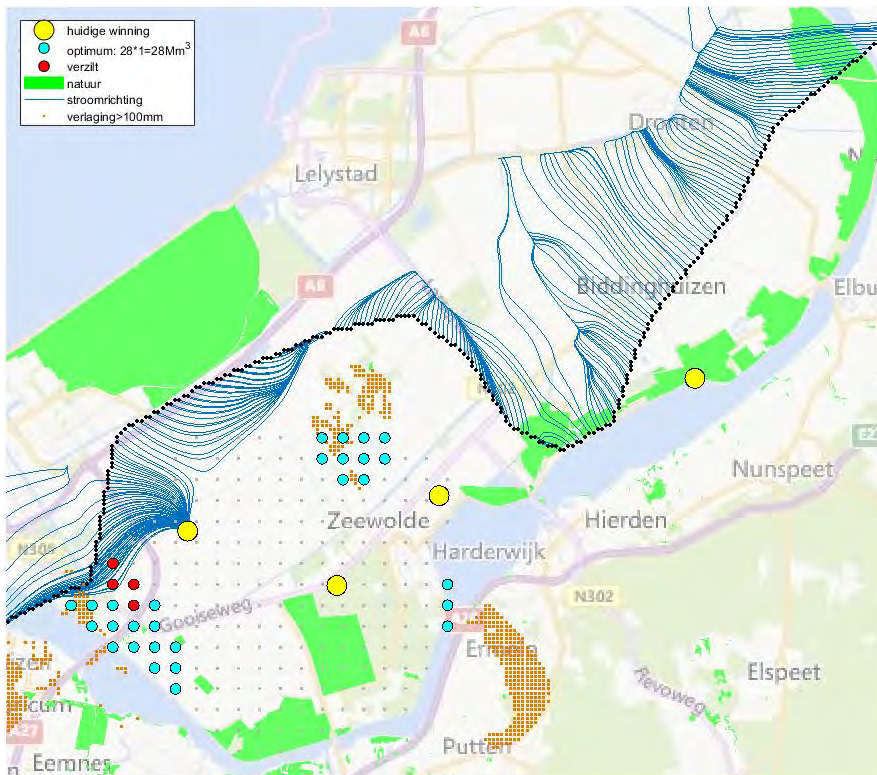
figuur 32: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 29 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter



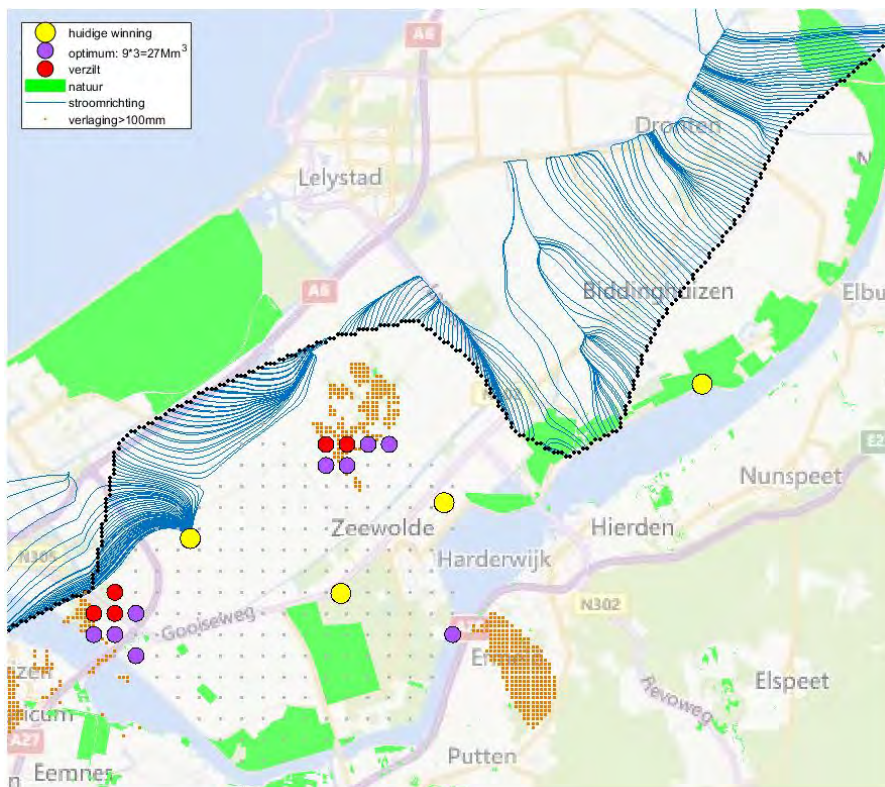
figuur 33: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 30 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 600 meter



figuur 34: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 28 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

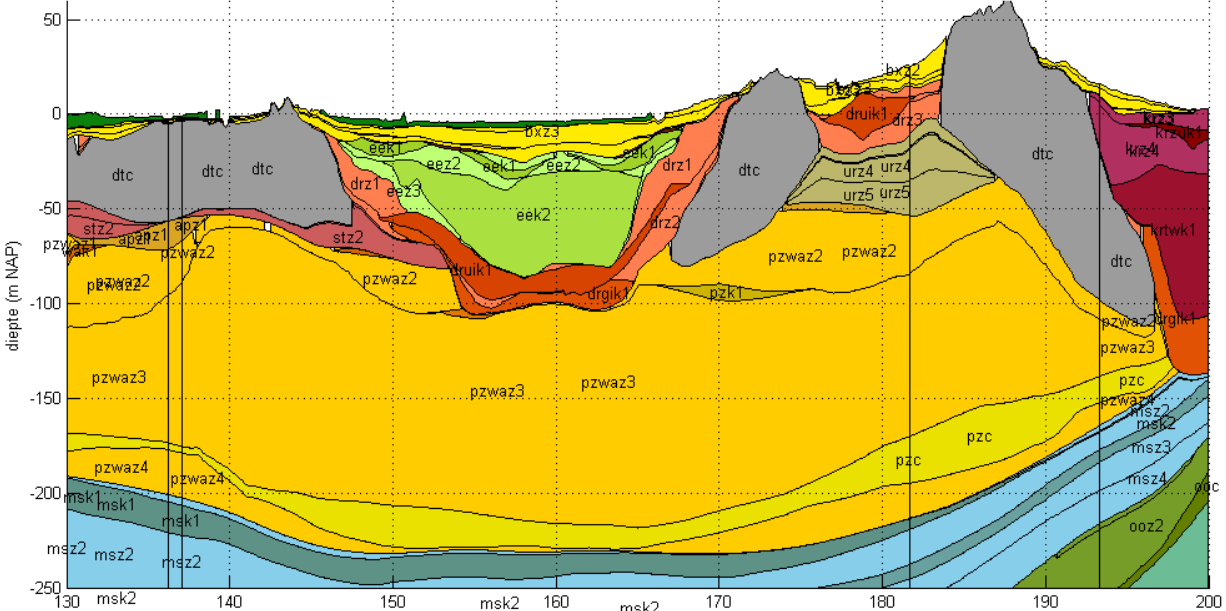
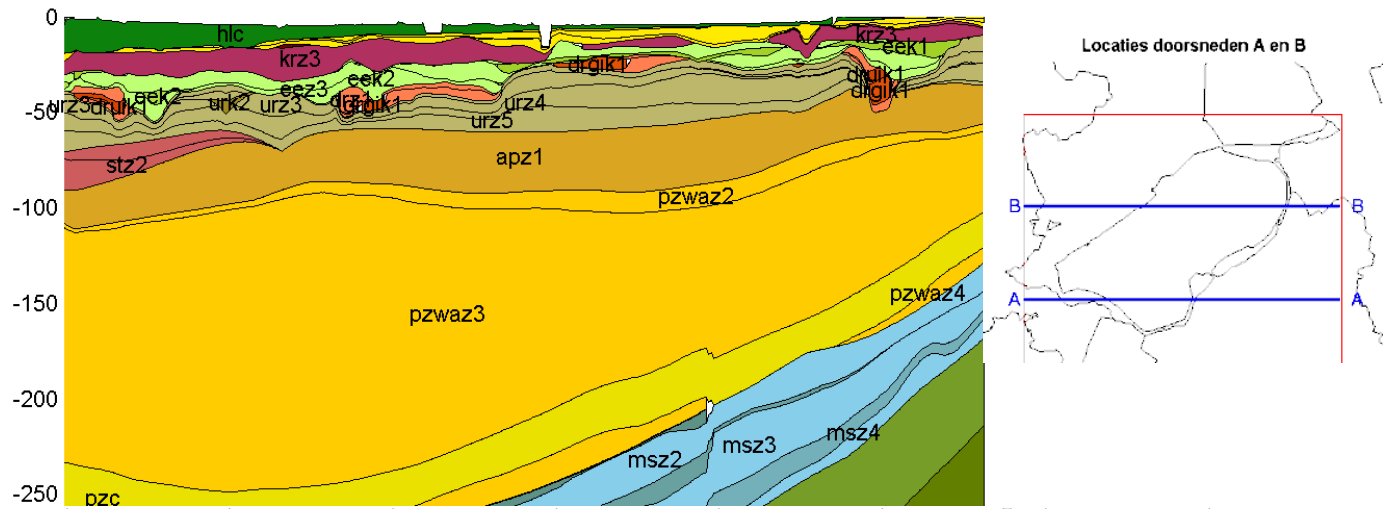
- maximaal 10cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 1 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter



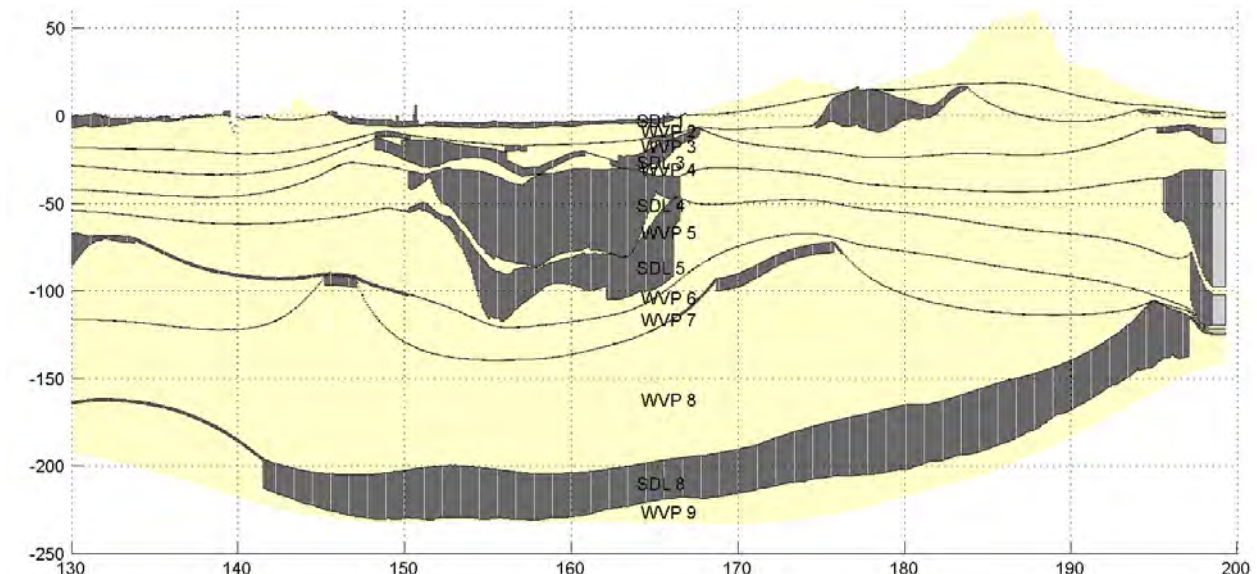
figuur 35: Optimale bijplaatsing van winningen (totaal 27 Mm³/jr) die voldoen aan de volgende criteria:

- maximaal 10cm verdroging in natuurgebieden
- geen verzilting
- maximale omvang per winning van 3 Mm³/jr
- op een onderlinge afstand van minimaal 1000 meter

Bijlage 3 Geologische dwarsprofielen



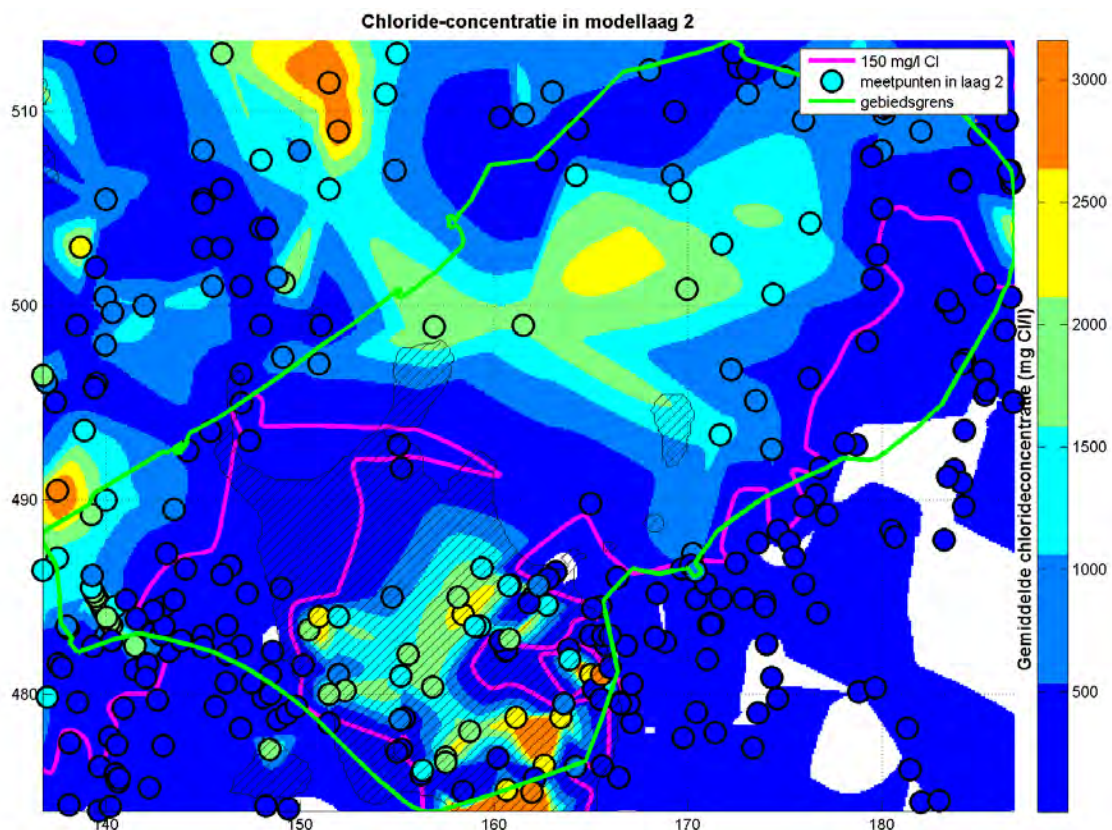
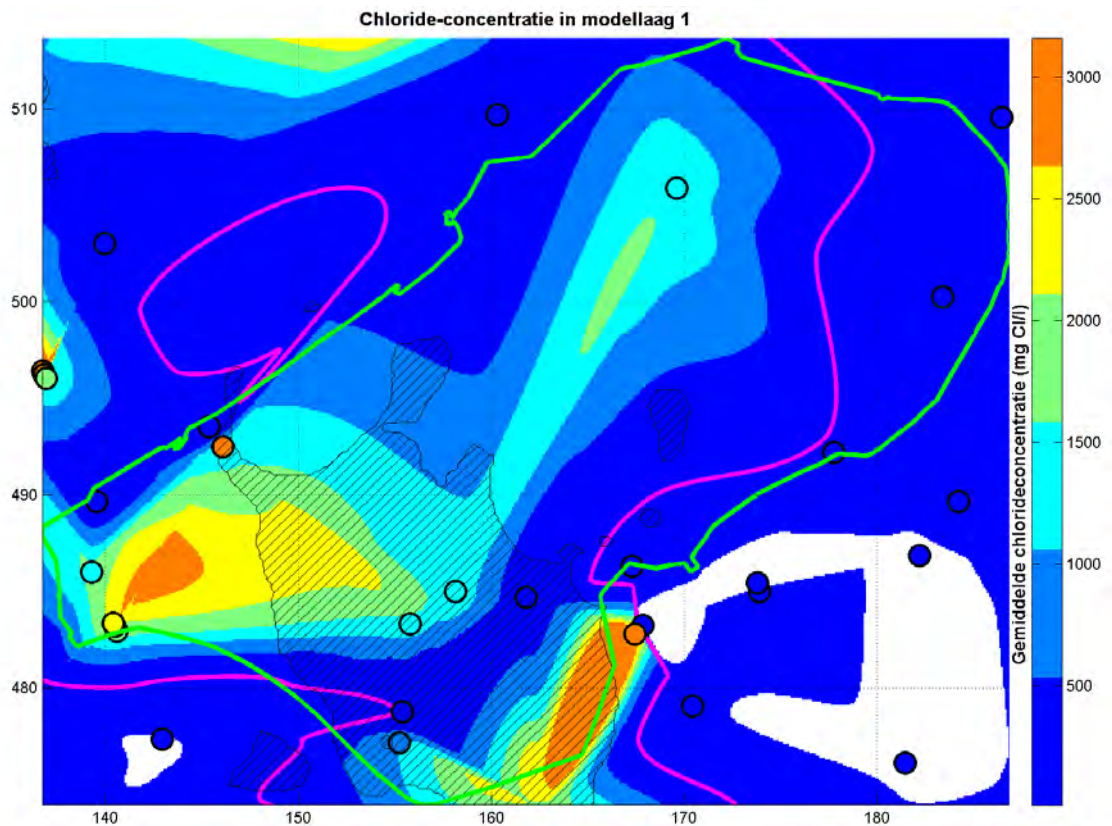
figuur 36: Geologische profielen: B-B' (boven) en A-A' (onder). Onder het diepe grondwater wordt water uit de formatie van Peize/Waalre (pzwaz*) verstaan.



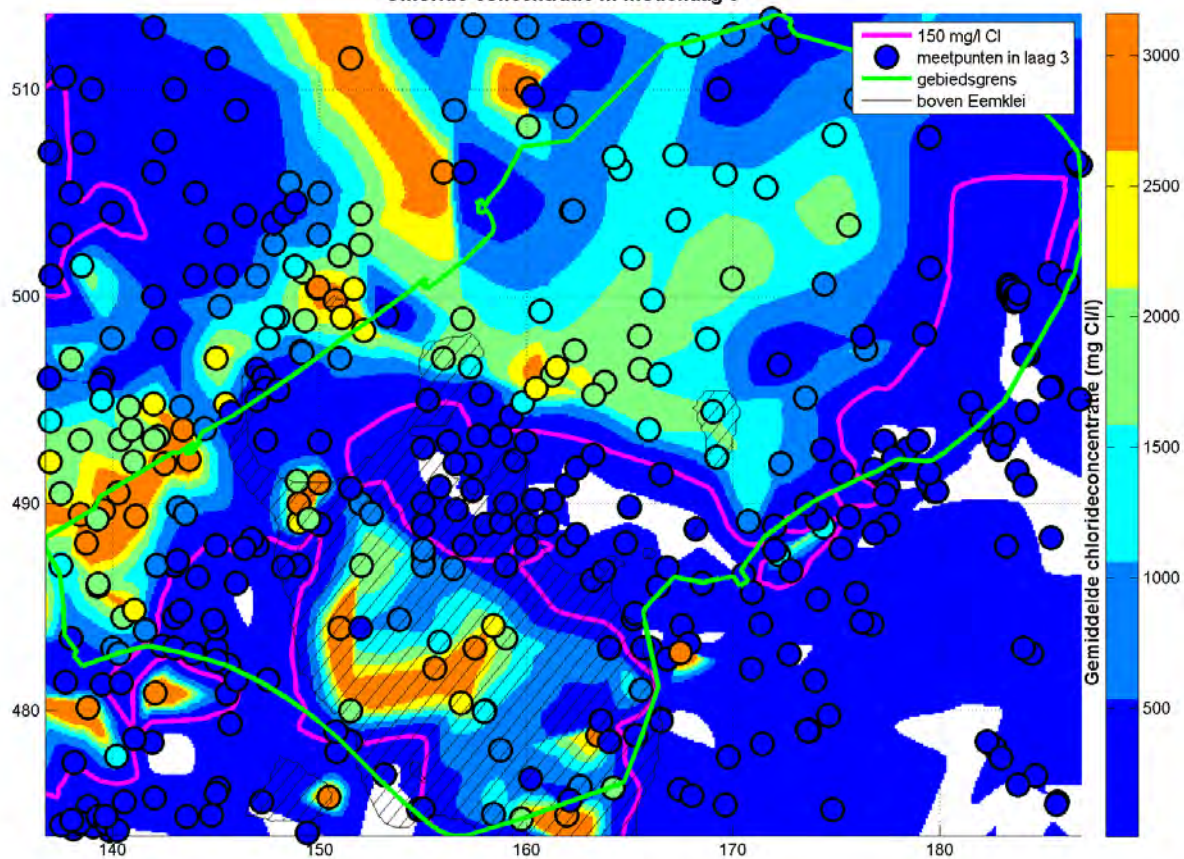
figuur 37: Model-profiel (doorsnede A-A'). De watervoerende pakketten (WVP) 6, 7 en 8 vormen de diepe aquifer.

Bijlage 4 Chloride verdeling ondergrond

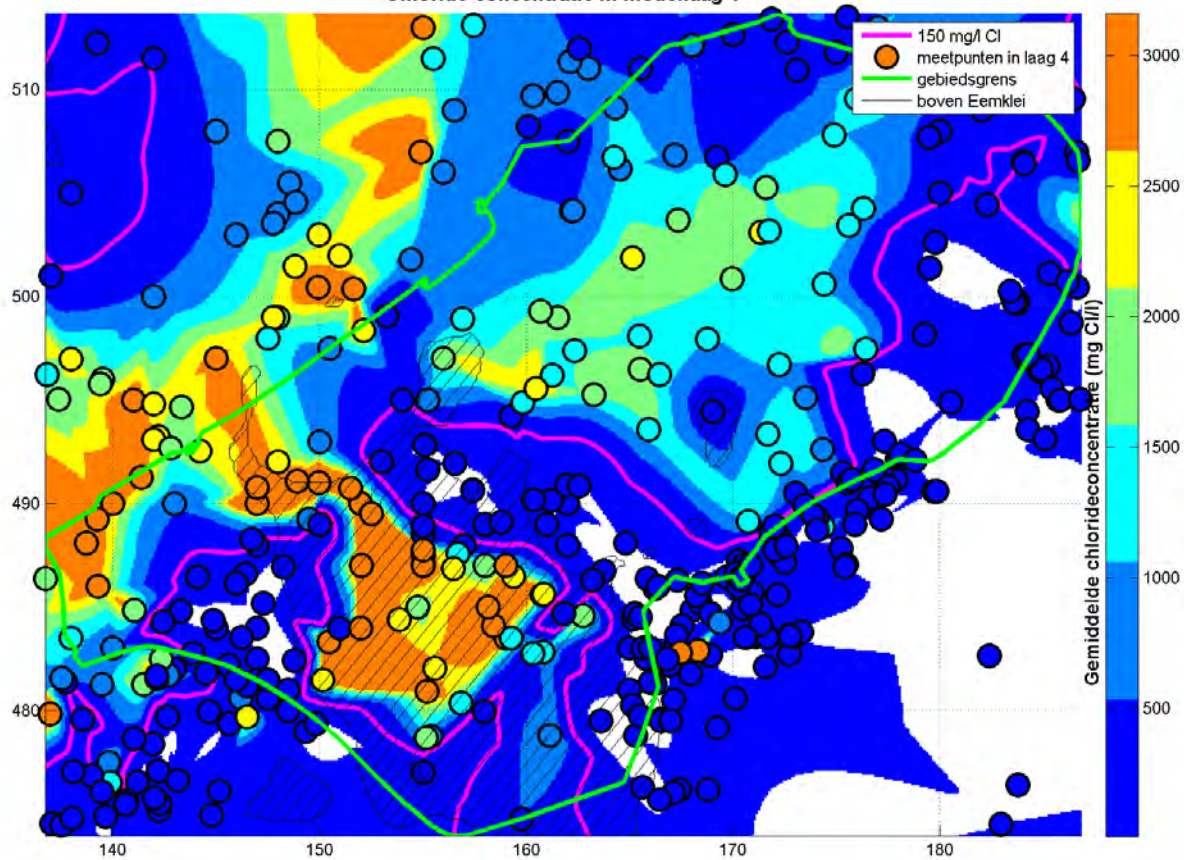
Deze bijlage geeft een overzicht van de meetpunten en de gemeten chlorideconcentratie-range per meetpunt en de daarvan afgeleide interpolaties per modellaag (zie Bijlage 3).



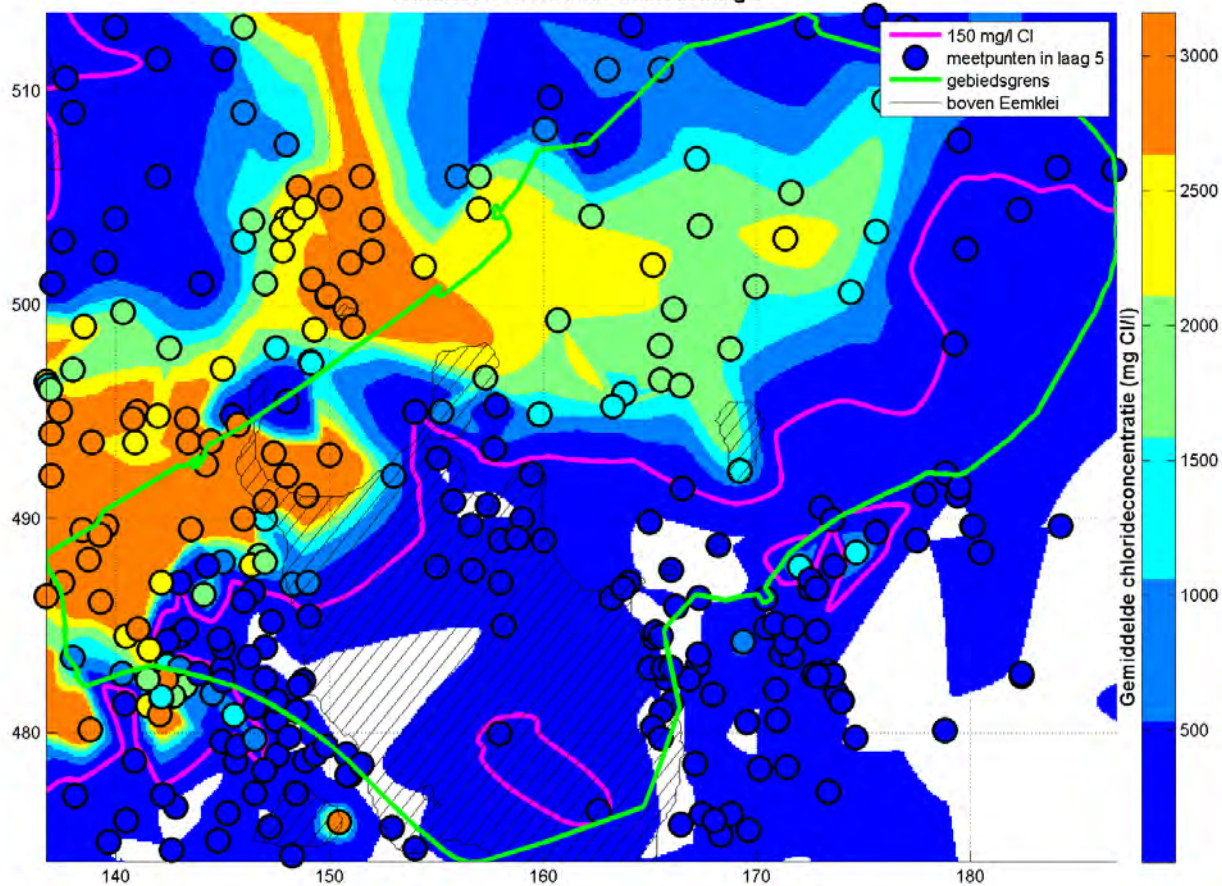
Chloride-concentratie in modellaag 3



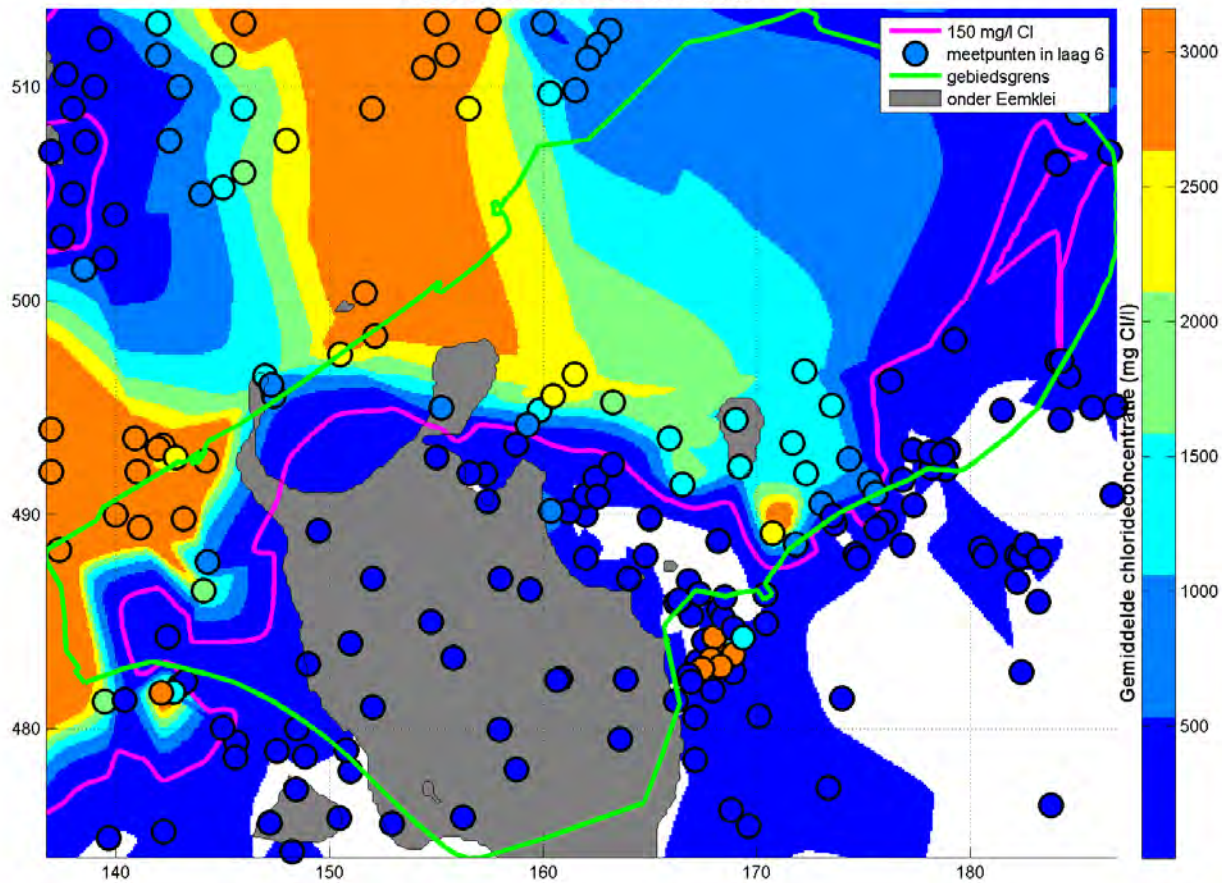
Chloride-concentratie in modellaag 4



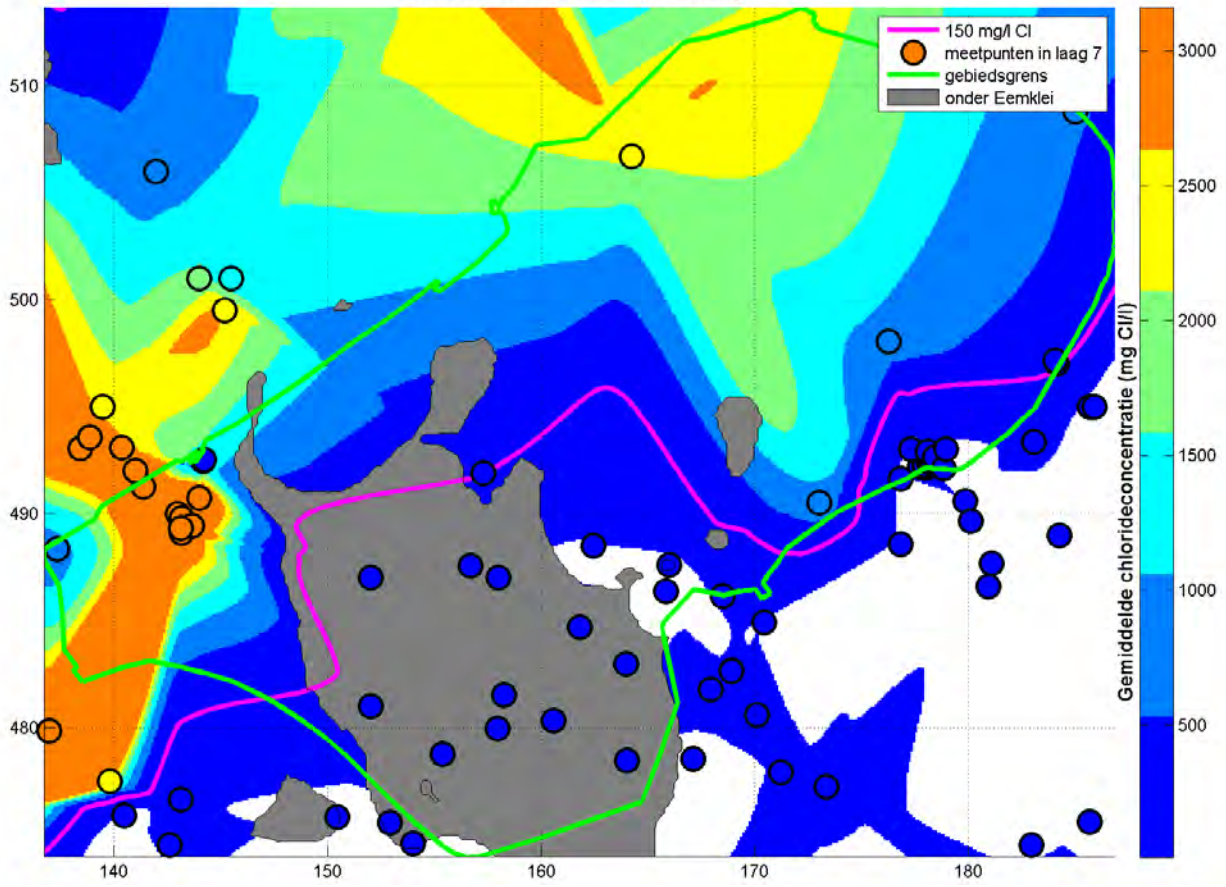
Chloride-concentratie in modellaag 5



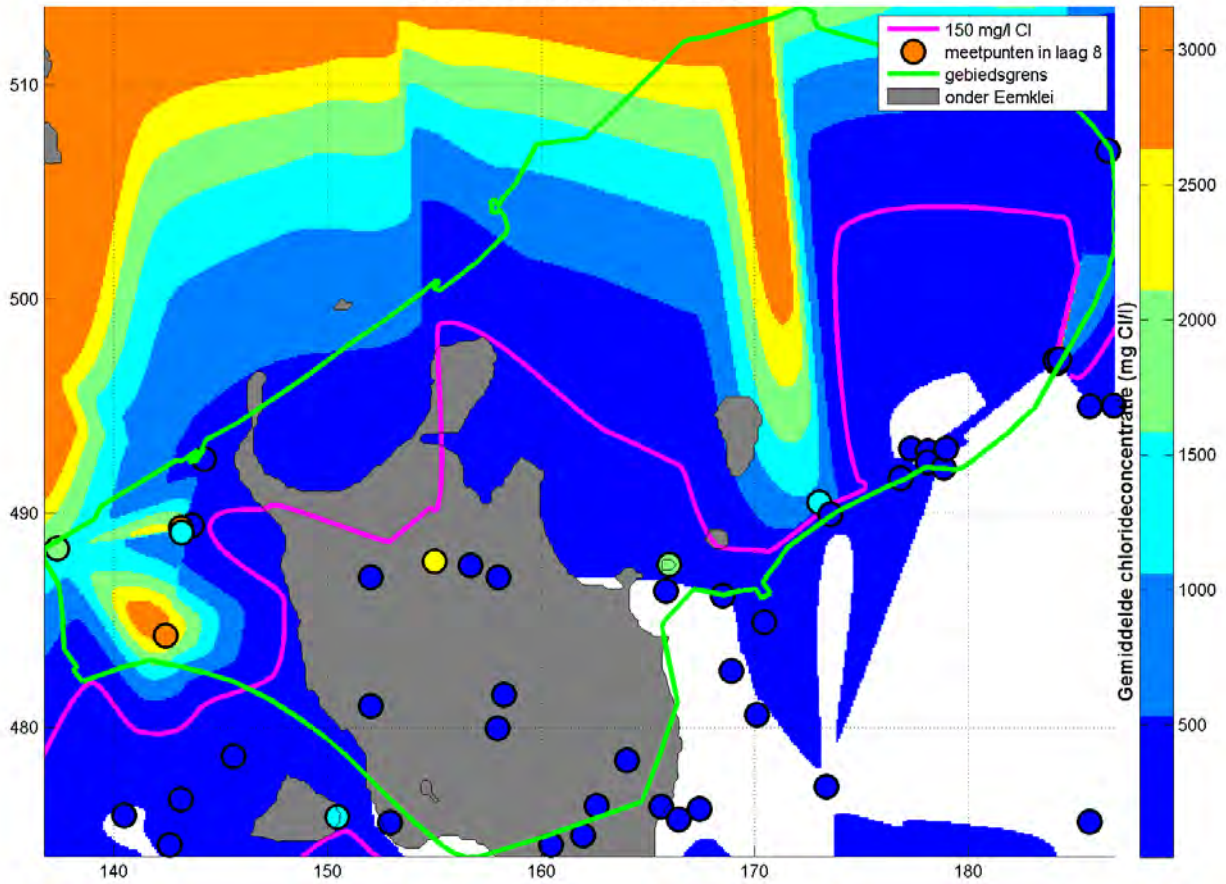
Chloride-concentratie in modellaag 6

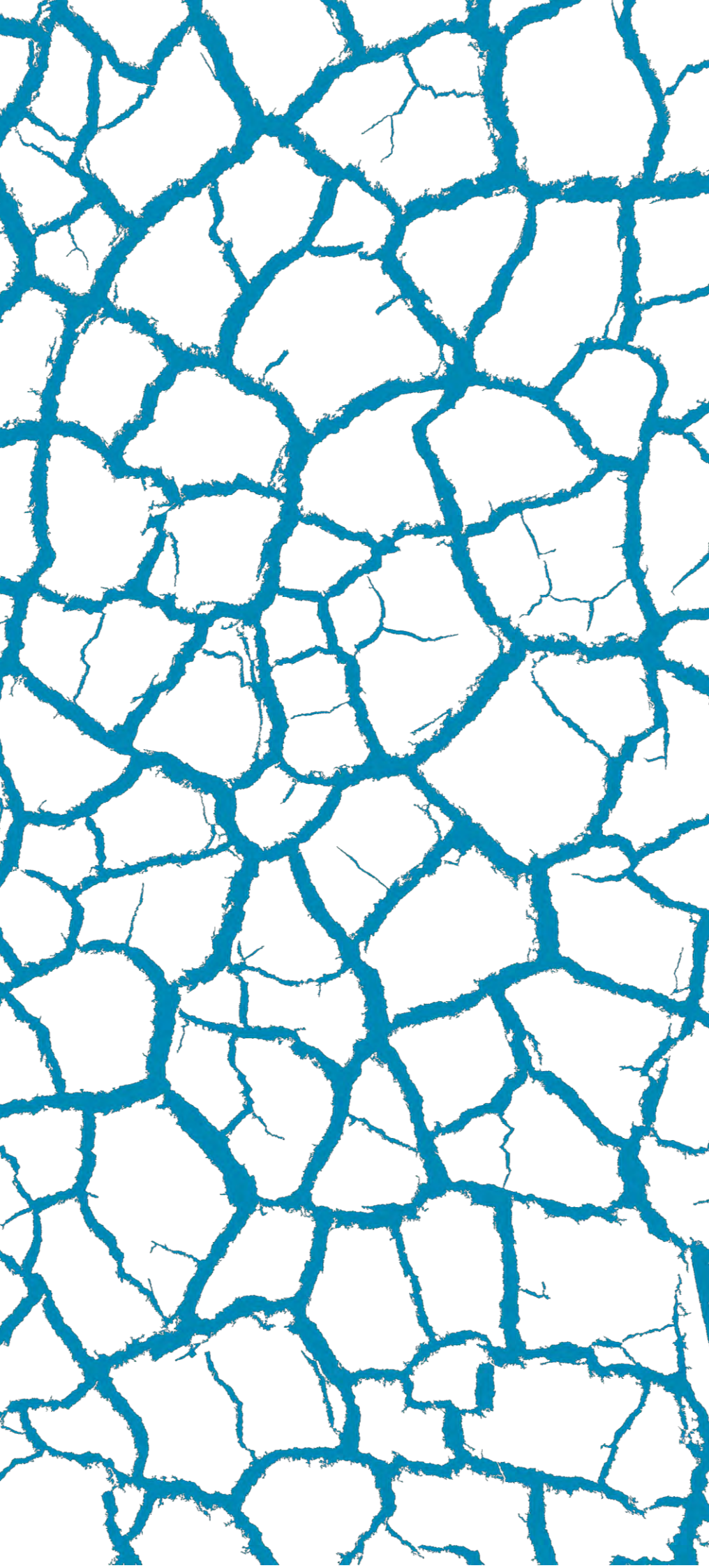


Chloride-concentratie in modellaag 7



Chloride-concentratie in modellaag 8





Korte Weistraat 12
2871 BP Schoonhoven
Tel: (0182) 387138
www.artesia-water.nl