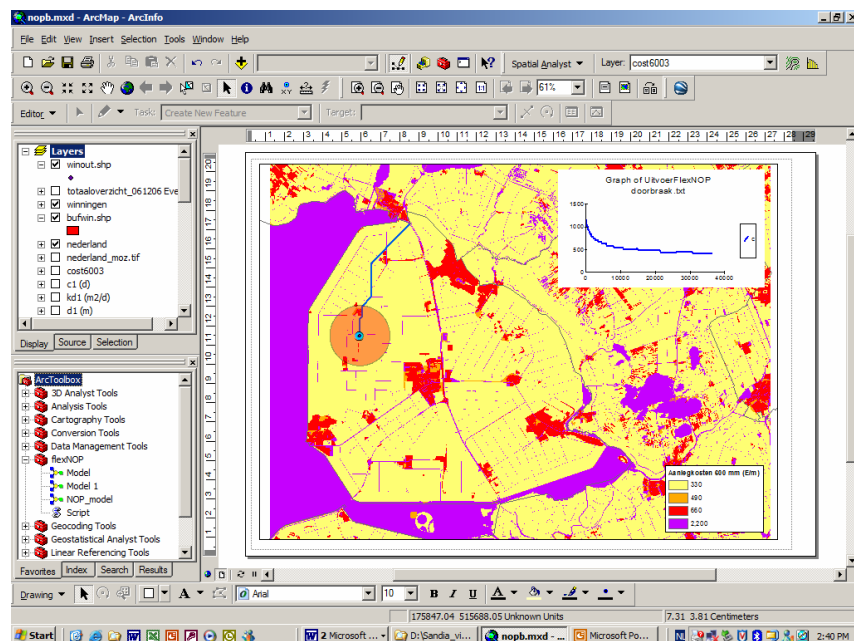


BTO2007.029
19 juni 2007

Flexwater

Pilot Noordoostpolder

Verkenndend onderzoek naar mogelijkheden voor
brakwaterwinning met Optiwin



BTO2007.029

19 juni 2007

Flexwater

Pilot Noordoostpolder

Verkenkend onderzoek naar mogelijkheden voor
brakwaterwinning met Optiwin

© 2007 Kiwa Water
Research
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.

Opdrachtgever
BTO

Projectnummer
11.1504.300

Kiwa Water Research
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein

Tel. 030 606 95 11
Fax 030 606 11 65
www.kiwawaterresearch.eu

Colofon

Titel

Flexwater
Pilot Noordoostpolder

Projectnummer

111.504.300.005

Projectmanager

Dr. Ir. H. van Oene MBA

Opdrachtgever

BTO

Kwaliteitsborger(s)

Prof. Dr. P. J. Stuyfzand

Auteur(s)

Dr. C. Vink
Prof. Dr. P. J. Stuyfzand
Drs. B. Raterman
Dr. C. Maas
Ing. I. Leunk
Ir. G. C. Cirkel

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Samenvatting

Dit rapport betreft een pilot studie van de derde fase van het Flexwater project. Doel van deze fase is het genereren en beoordelen van kansrijke nieuwe concepten voor productie en transport van drinkwater in *bestaande* situaties, zodat de drinkwatervoorziening kosteneffectiever wordt, minder verdroging veroorzaakt, de vergunde capaciteit beter wordt benut en beter is ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen.

Voor de realisatie van het hierboven beschreven doel is een beslissingondersteunend planningsinstrument ontwikkeld (Optiwin), waarmee de bijdrage van flexibele oplossingen aan de optimalisering van de drinkwatervoorziening in beeld wordt gebracht. Het instrument bestaat uit een set effectmodellen en een optimalisatiemodule, gekoppeld met een GIS. Welke effectmodellen in de set worden opgenomen varieert afhankelijk van de doelstellingen van het betreffende onderzoek.

De eerste stappen in de bouw van dit instrument zijn in de onderhavige studie gerealiseerd, verdere ontwikkeling vindt plaats in de tweede Flexwater pilot, bij Brabant Water.

Doelen

In de onderhavige pilot studie zijn kansen en mogelijkheden voor brakwaterwinning in de Noordoostpolder onderzocht. Vanuit het perspectief van het bedrijfstakonderzoek (BTO) staat de ontwikkeling van Optiwin centraal, maar ook is brakwater een nieuw brontype voor de Nederlandse drinkwatersector en is het daarom nuttig om mogelijkheden van brakwaterwinning in de Noordoostpolder te verkennen.

Uitvoering

Het grondwater van de Noordoostpolder is op veel plaatsen brak. De zoutconcentratie neemt geleidelijk toe met de diepte. Uit berekening van de BEX (base-exchange index) volgens Stuyfzand blijkt dat onder de Noordoostpolder verzilting optreedt. Dit fenomeen is een gevolg van de aanleg van de Afsluitdijk en de IJsselmeerpolders. Brakwater vanuit de tijd van de Zuiderzee stroomt onder invloed van de hydraulische gradiënt geleidelijk richting de Noordoostpolder en komt daar als kwel in het slotenstelsel. Deze kwel heeft een negatieve invloed op de ecologische kwaliteit van oppervlaktewater in de polder en - na uitgeslagen te zijn door de gemalen - het IJsselmeer.

Met de set effectmodellen die is gemaakt voor deze pilot kunnen de volgende aspecten van een grondwaterwinning gekwantificeerd worden:

- effect op de grondwaterstand, als indicator van verdroging en landbouwschade;
- reductie van kwel en daarmee van de zoutlast van de Noordoostpolder;
- ontwikkeling van te verwachten chlorideconcentratie in het ruwwater in de tijd;

- netto contante waarde van de win- en zuiveringskosten;
- optimaal tracé voor het koppelen van de winning aan het transportnetwerk.

Met behulp van de optimalisatiemodule is verkend welke locaties het meest geschikt zijn voor een grondwateronttrekking. Daarbij is de methode van het "wandelende pompstation" toegepast en is zowel de grootte van het debiet per locatie als de verdeling van het debiet over de twee watervoerende pakketten geoptimaliseerd.

Resultaten

Bij uitvoering van deze studie is gebleken dat modulaire koppeling van de optimalisatiemodule en de effectmodellen met de ArcGis Model-builderomgeving een efficiënte techniek is waarmee in korte tijd de technische haalbaarheid van brakwaterwinning in de Noordoostpolder kon worden verkend.

Een eventuele brakwaterwinning kan de kwel doen afnemen en leiden tot een verbetering van de kwaliteit van het oppervlaktewater in de Noordoostpolder, terwijl kunstmatige infiltratie van brijn in diepgelegen aquifers zonder ecologische schade gerealiseerd kan worden. Zowel landbouw als aquatische flora en fauna zouden daar vruchten van plukken.

Uit de berekeningen blijkt dat door de onttrekking versnelde verzoeting van de ondergrond optreedt, die bij grotere debieten sturend is voor de kosten. Zonder verdiscontering van kosten om brijn in diepe aquifers te pompen ligt het optimum bij 10 Mm³/j reinwater (=20 Mm³/j ruwwater bij 50% recovery). Een hoger debiet leidt tot hogere kosten per kubieke meter, primair als gevolg van de gehanteerde grens voor verschuldigde grondwaterbelasting bij 300 mg/l chloride (Wet Belastingen op Milieugrondslag 1994, art. 3b).

Vergunningtechnische aspecten van een eventuele brakwaterwinning, en met name de injectie van brijn in de ondergrond, vormen belangrijke factoren die in deze verkenning buiten beschouwing zijn gelaten. De eindigheid van de brakwaterbron onder de Noordoostpolder is een gevolg van menselijk ingrijpen in de vorm van de aanleg van de Afsluitdijk en de inpoldering van gebieden die ooit tot de Zuiderzee behoorden. In KRW (Kaderrichtlijn Water) perspectief lijkt het zwaartepunt van de afweging te liggen bij de te verwachten verbetering van de oppervlaktewaterkwaliteit in zowel de polder zelf als het IJsselmeer.

Inhoud

	Samenvatting	1
	Inhoud	3
1	Inleiding	5
1.1	Achtergrond	5
1.2	Knelpunten drinkwatervoorziening Noordoostpolder	6
1.3	Brakwater als bron	6
2	Beschrijving Noordoostpolder	7
2.1	Waterhuishouding	7
2.2	Geohydrologie	7
2.3	Chlorideconcentraties in grondwater Noordoostpolder	9
3	Opzet van het instrument Optiwin	17
3.1	Twee sporen	17
3.2	ArcGIS modelbuilder	19
3.2.1	Modelstappen	19
3.2.2	Modeluitvoer	20
3.3	Effectmodellen hydrologie en hydrochemie	22
3.4	Effectmodel zuiveringskosten	27
3.5	Optimaal leidingtracé en effectmodel transportkosten	31
3.6	Optimalisatiemodule	32
3.6.1	Appels en peren: Pareto efficiëntie	33
4	Resultaten	37
4.1	Opzet van de optimalisatie	37
4.2	Resultaten	38
4.3	Chemische aspecten	41
4.4	Algemene conclusies en aanbevelingen	52
5	Literatuur	53
6	Bijlagen	55
7	Presentaties	61

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Nederlandse drinkwatervoorziening is zeer betrouwbaar en efficiënt. Niettemin bestaan er diverse (mogelijke) ontwikkelingen die het noodzakelijk maken om de huidige inrichting van de drinkwatervoorziening tegen het licht te houden: schaalvergroting, klimaatverandering, ontwikkelingen van de watervraag, terrorisme, vervanging van infrastructuur, fusies, waterwinningen met kwaliteitsproblemen en technologische ontwikkelingen geven aanleiding om de bestaande praktijk tegen het licht te houden en alternatieven te onderzoeken.

De hierboven genoemde ontwikkelingen beïnvloeden de randvoorwaarden en uitgangspunten op basis waarvan investeringsbeslissingen worden genomen en stellen waterbedrijven continu voor de uitdaging om de watervoorziening te (her) optimaliseren. Flexibilisering van de drinkwatervoorziening biedt mogelijkheden om in te spelen op de geschetste toekomstige ontwikkelingen en is een bouwsteen om de watervoorziening verder te optimaliseren.

In de eerste fase van het project Flexwater zijn winbare grondstofbronnen geïnventariseerd en zijn rekenregels ontwikkeld om de bedrijfseconomische kosten van winning, zuivering en transport te kwantificeren (Ramaker et al. 2006). In de tweede fase van het project zijn vormen van flexibele drinkwatervoorziening verkend, o.a. door het beschrijven van concepten vanuit een “groene weide- perspectief”, waarbij de bestaande inrichting van de drinkwatervoorziening buiten beschouwing werd gelaten. In de derde fase van het project wordt de haalbaarheid van flexwaterconcepten getoetst aan concrete, bestaande situaties, waarbij de opbrengsten van de vorige fasen van het project worden meegenomen in de kostenmodellen en bij scenariokeuzen. Er wordt rekening gehouden met de specifieke boekwaarden en exploitatiekosten van bestaande productiemiddelen. De beoordeling van de kansrijkheid van flexwaterconcepten wordt daardoor complexer. Er zijn weinig *technische* beperkingen bij drinkwaterproductie en transport, zodat er veel verschillende manieren zijn om aan de drinkwatervraag te voldoen. Naast technische haalbaarheid zijn er ook andere criteria waar alternatieven op getoetst moeten worden, zoals leveringszekerheid, bedrijfseconomie, reinwaterkwaliteit, flexibiliteit, ecologie en ruimtelijke en bestuurlijke ontwikkelingen.

Doel van de derde fase van het project Flexwater is het efficiënt genereren en beoordelen van kansrijke nieuwe concepten voor productie en transport van drinkwater in bestaande situaties, zodat de drinkwatervoorziening kosteneffectiever wordt, minder verdroging veroorzaakt, de vergunde capaciteit beter wordt benut en beter is ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen.

Voor de realisatie van het hierboven beschreven doel wordt een beslissingondersteunend planningsinstrument ontwikkeld (werktitel Optiwin), bedoeld voor verkennende studies op regionale schaal, waarmee de bijdrage van flexibele oplossingen aan de optimalisering van de drinkwatervoorziening in beeld wordt gebracht. Het instrument bestaat uit een set effectmodellen en een optimalisatiemodule, gekoppeld met een GIS (geografisch informatiesysteem). De set effectmodellen varieert afhankelijk van de doelstellingen van het betreffende onderzoek. De eerste stappen in de bouw van dit instrument zijn in de onderhavige studie gerealiseerd, verdere ontwikkeling vindt plaats in de Flexwater pilot bij Brabant Water.

1.2 Knelpunten drinkwatervoorziening Noordoostpolder

Het drinkwater voor de Noordoostpolder wordt van buiten de polder aangevoerd, van het Vitens pompstation St. Jansklooster. Op termijn wordt verwacht dat de capaciteit van dit station onvoldoende is om de match tussen vraag en aanbod te handhaven. In de nabije toekomst zullen verouderde asbestcementleidingen vervangen moeten worden om de verblijftijd in de transportleidingen te reduceren en zo een kwaliteitsverbetering van het drinkwater te bewerkstelligen. De AC leidingen die relatief oud zijn en in zettingsgevoelige bodem liggen kunnen op termijn een knelpunt gaan vormen.

1.3 Brakwater als bron

In overleg met betrokkenen bij Vitens is besloten om in de “Flexpilot Noordoostpolder” de mogelijkheden te verkennen om brakwater te winnen. Vanuit het perspectief van het bedrijfstakonderzoek (BTO) staat de ontwikkeling van Optiwin centraal, maar tegelijkertijd is brakwater een nieuw brontype voor de Nederlandse drinkwatersector en is het daarom ook nuttig om mogelijkheden van brakwaterwinning in de Noordoostpolder te verkennen.

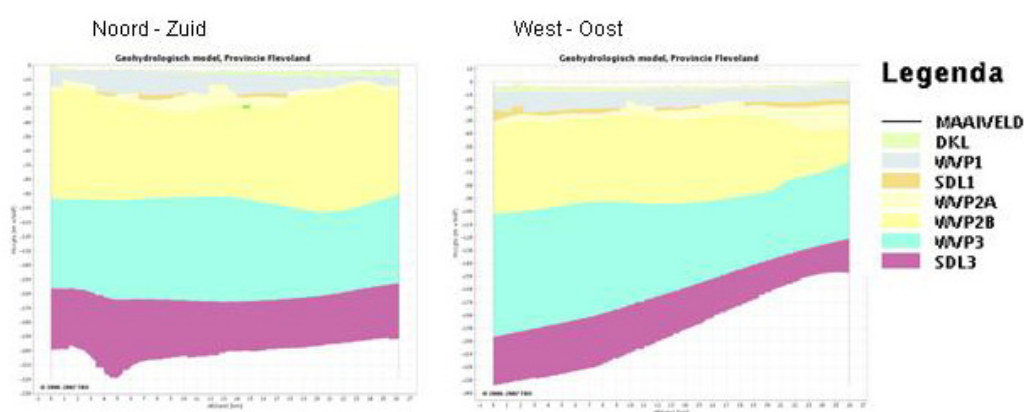
2 Beschrijving Noordoostpolder

2.1 Waterhuishouding

De Noordoostpolder is in 1942 ingepolderd. Het is een gebied van ongeveer 46.000 ha, behorende tot de provincie Flevoland. De bodem bestaat uit jonge zeeklei in het lager gelegen midden en westen van de polder, en hoger gelegen zandgronden langs de rand van Overijssel en Friesland. De gemiddelde maaiveldhoogte in de Noordoostpolder is 3,44 m -NAP. De waterstand van het IJsselmeer is gemiddeld 0,25 m -NAP, zodat het potentiaalverschil ten opzichte van het omringende oppervlaktewater bijna 5,00 m waterkolom bedraagt. Door de lage ligging van de polder is er sprake van veel kwel. De kwel vanuit Overijssel en Drenthe is overwegend van goede kwaliteit, maar de regionale kwel vanuit noordelijke en westelijke richting is voedselrijk en licht brak. Deze kwel heeft een negatieve invloed op de ecologische kwaliteit van oppervlaktewater in de polder en het IJsselmeer. In droge perioden wordt veel oppervlaktewater aangevoerd naar de zandgronden langs de rand van Overijssel en Friesland om landbouwschade te voorkomen. Uiteindelijk komt dat water voorzover het niet verdampt terecht in het slootstelsel van de Noordoostpolder en wordt samen met het overige kwelwater weer uitgeslagen door de gemalen bij Urk en Lemmer.

2.2 Geohydrologie

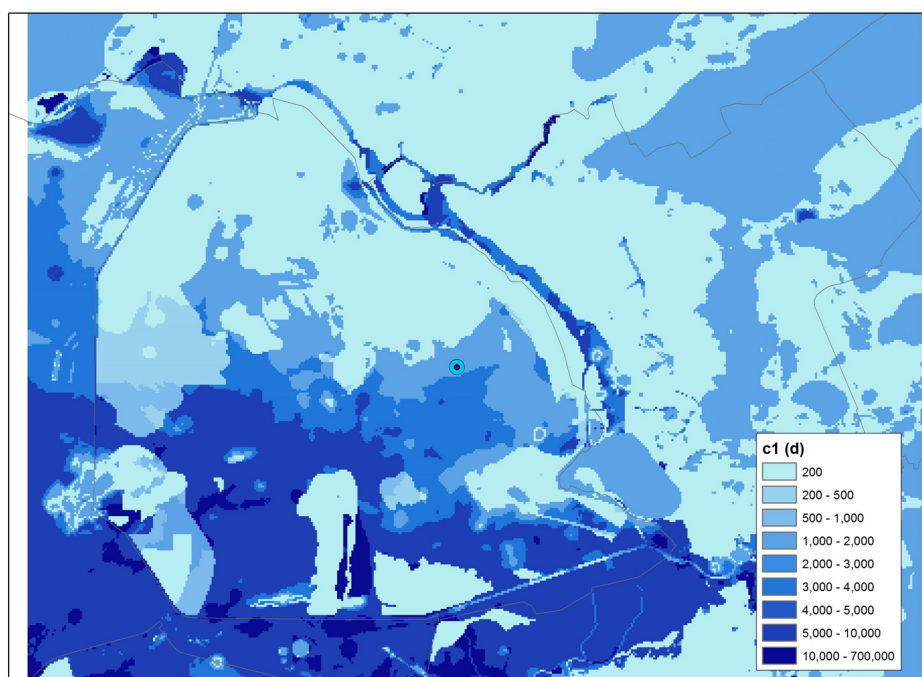
De geohydrologische schematisatie is in Figuur 1 in noord-zuid en een west-oost doorsnede weergegeven.



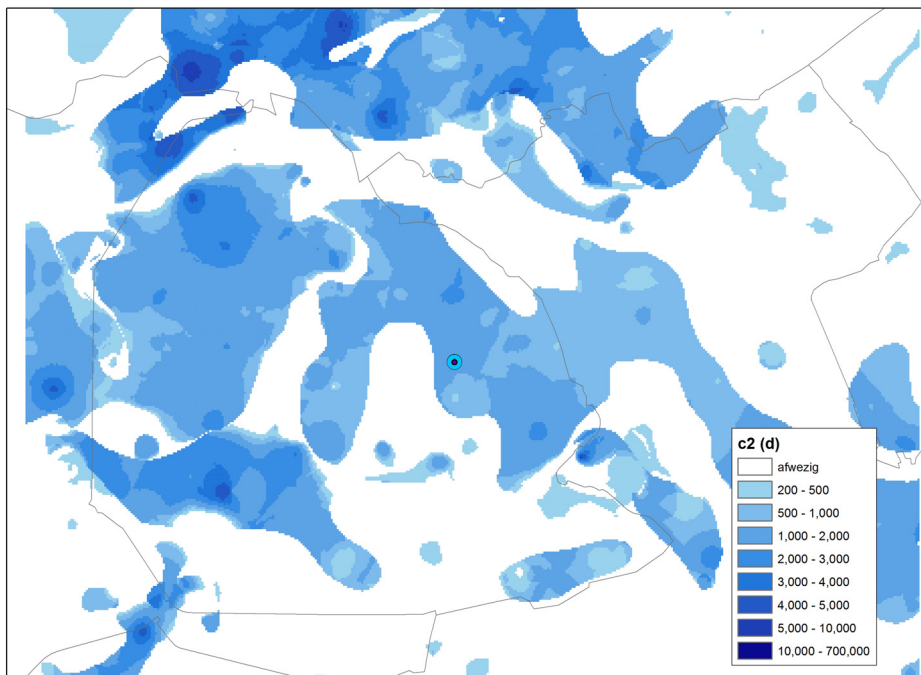
Figuur 1: Schematisatie van de hydrogeologische opbouw Noordoostpolder

De deklaag is in het overgrote deel van de polder aanwezig en is gemiddeld circa 5 meter dik, maar op enkele plaatsen dunner of afwezig. De deklaag bestaat overwegend uit Holocene kleien, zavel, veen en keileem. Onder de deklaag ligt het eerste watervoerende pakket, bestaande uit fijne tot zeer

grove zanden uit de Formaties van Kreftenheye en Bortel. De eerste scheidende laag bestaat uit klei en keileem van de Formaties van Kreftenheye, Urk, Drenthe en de Eemformatie. De verschillende afzettingen komen verspreid over de Noordoostpolder voor. Ook de hydraulische weerstand van deze slechtdoorlatende laag is ruimtelijk sterk variabel. Door de ruimtelijke variatie van de hydraulische weerstanden en de maaiveldhoogten in de polder is ook de sterkte van de regionale kwelflux ruimtelijk sterk variabel. Onder de eerste scheidende laag ligt het tweede watervoerende pakket, bestaande uit matig fijne tot grove afzettingen uit de Formaties van Urk, Drenthe, Peize en Waalre. Dit pakket heeft een dikte van 70 – 190 m.



Figuur 2 Hydraulische weerstand van de deklaag in dagen



Figuur 3 Hydraulische weerstand van de 1^e slechtdoorlatende laag in dagen

2.3 Chlorideconcentraties in grondwater Noordoostpolder

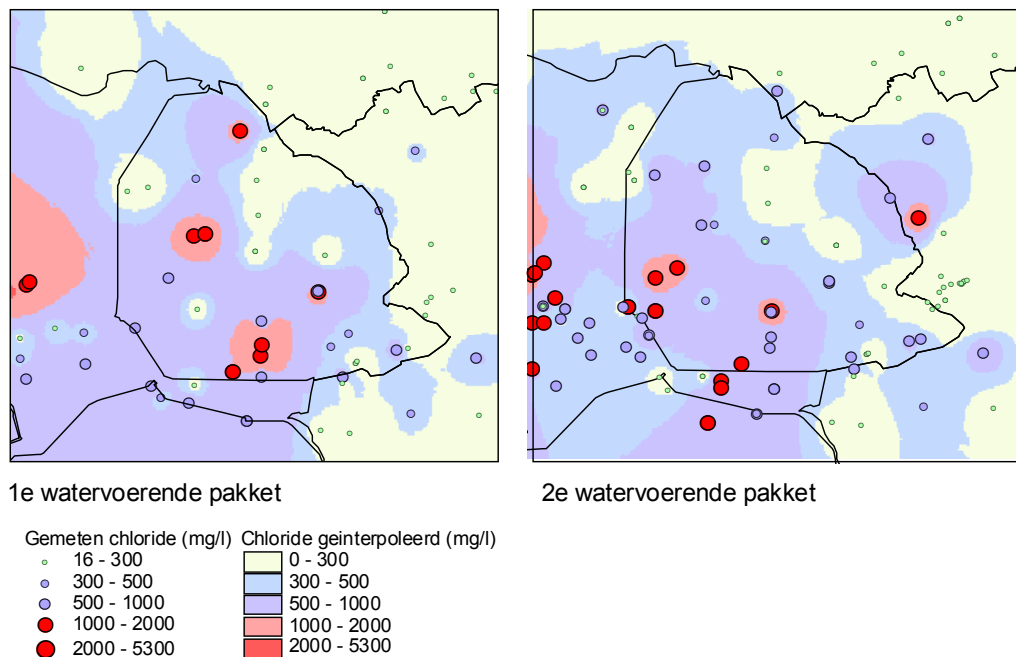
Voor het project Flexwater is de ruimtelijke verdeling van de chlorideconcentratie in het grondwater van de Noordoostpolder indicatief bepaald op basis van bestaande gegevens. Er is gebruik gemaakt van de Grondwaterkaart van Nederland en van analyses uit Dino. Van een gebied van ruim 1500 km² (Noordoostpolder en omgeving) zijn alle chloridemetingen verwerkt. In totaal zijn er in dit gebied 256 filters waar chloride is gemeten.

Op enkele plaatsen onder zowel de Noordoostpolder als het IJsselmeer komt onder de Eemformatie een zoetwaterbel voor (grondwaterkaart 1979). De kartering van het voorkomen van zoet water is mede gebaseerd op geoelectrisch onderzoek. Bij het bekijken van de chlorideconcentraties is onderscheid gemaakt tussen het 1^e, 2^e en 3^e watervoerende pakket. Het 2^e watervoerende pakket (WVP2a en WVP2b) loopt van 20 tot 60 - 90 m-NAP, WVP3 loopt van 60 - 90 tot 150 m-NAP.

Ruimtelijke spreiding op basis van alle meetpunten

Op basis van alle metingen is de ruimtelijke spreiding van het chloridegehalte in het grondwater gemaakt. We maken hierbij gebruik van de volgende indeling:

- zoet < 300 mg/l
- licht brak 300 - 500 mg/l
- matig brak 500 - 1000 mg/l
- brak 1000 - 2000 mg/l
- zeer brak 2000 - 10000 mg/l



Figuur 4 Ruimtelijke verdeling van chlorideconcentratie in WVP1 en WVP2a

In WVP 2b zijn slechts 10 meetpunten, dit is niet voldoende om een vlakdekkend beeld te schetsen. Op het vaste land is het chlorideconcentratie laag tot grote diepte. Onder de Noordoostpolder is het beeld wisselend. In het noordelijk deel liggen 2 diepe putten, de westelijke heeft een chloridegehalte van 500 mg/l op 80 meter diepte, terwijl de 5 km verder gelegen put op dezelfde diepte een chloridegehalte van 1800 mg/l heeft. De oostelijke put heeft op zeer grote diepte (-220 m NAP) weer een chloridegehalte beneden 1000 mg/l. In het zuidelijke deel van de polder liggen nog drie waarnemingsputten. Hier is duidelijk te zien dat het zout-brak grensvlak naar het westen toe hoger komt te liggen.

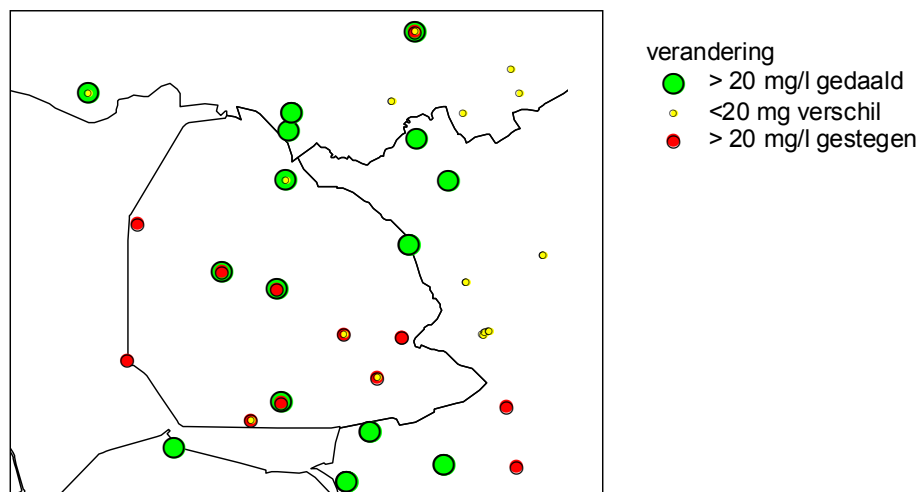
Anomalieën

In het brakke water onder de Noordoostpolder en het IJsselmeer, komen bellen voor met een hogere of lagere chlorideconcentratie dan in de omgeving. Op het vaste land zien we lokaal brakwater bellen in het zoet water.

Ten noorden en oosten van Emmeloord en ten westen van Creil (deels onder het IJsselmeer) bevinden zich twee gebieden met zoet water in WVP 1 en 2a. Brakwaterbellen liggen ten westen van Emmeloord en rond het voormalige Schokland. Op het vasteland komt brak water voor onder het Kamperland, het gebied rond Genemuiden/Zwartsluis en de Weerribben. Zowel in WVP 1 als 2a ligt het chloridegehalte hier rond 500 mg/l.

Veranderingen

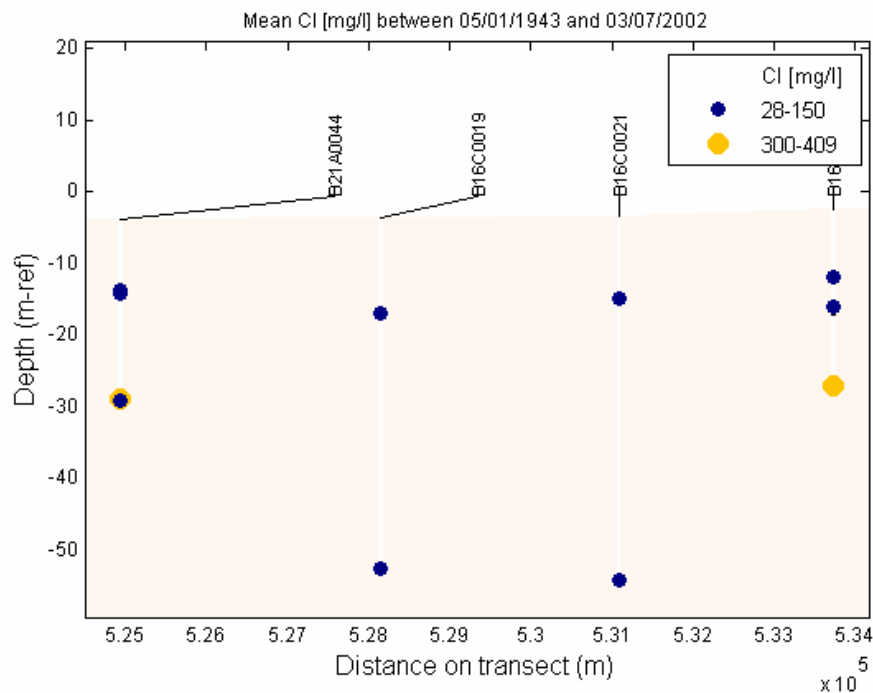
De voorgaande interpretaties van het chloridegehalte zijn gedaan met behulp van de gemiddelde waarde van ieder meetpunt. Op een deel van de meetlocaties is vaker gemeten en kan een uitspraak gedaan worden over de veranderingen in de tijd.



Figuur 7 Veranderingen van de chlorideconcentraties in de tijd

Figuur 7 geeft een eerste indruk van de veranderingen. Het verschil tussen de eerste en laatste meting is aangegeven. Het valt op dat op één locatie zowel een stijging als een daling kan optreden, doordat er meerdere filters zijn. De meeste stijgingen zien we in watervoerend pakket 2a (tussen -30 en 35 m NAP), bij meetpunten op de Noordoostpolder. Bij twee meetpunten (de noordoostelijke) zien we een stijging tussen 1980 en 2000, de andere 5 zijn gemeten tussen 1940 en 1960. Het is dus niet duidelijk of de stijging zich hier de laatste 25 jaar verder heeft doorgezet.

De daling van het chloridegehalte in de Noordoostpolder is over het algemeen klein en heeft zich voorgedaan in het 1^e watervoerende pakket. Buiten de Noordoostpolder zien we zowel in het 1^e als in het 2^e WVP dalingen van het chloridegehalte.



Figuur 8 Chlorideconcentraties in een dwarsdoorsnede ter hoogte van de noordelijke zoetwaterbel

In Figuur 8 is het chloride ter hoogte van de noordelijke zoetwaterbel weergegeven. De put, het meest links (put 44, net ten noorden van Emmeloord) laat twee waarden zien (<150 en >300 mg/l). Er is drie keer gemeten, tussen 1942 en 1958 steeg het chloridegehalte van 50 naar 125 mg/l, in 1990 was het verder gestegen tot ruim 400 mg/l. De meest noordelijke put is van 1980 – 2002 gemeten en laat geen duidelijke verandering zien. De tussenliggende putten zijn slechts 1 keer gemeten. De stijging aan de zuidelijke begrenzing van de zoete bel geeft aan dat hier nog geen evenwicht bereikt is.

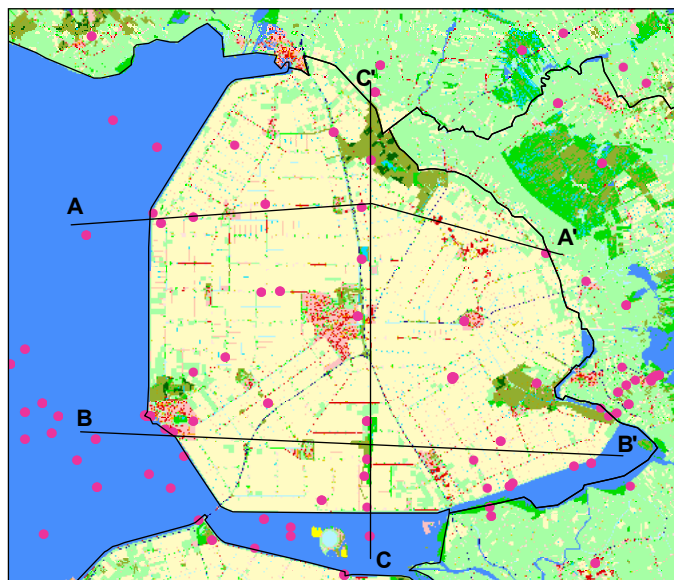
De bemaling van de polder zorgt voor een constante kwelstroom. Voor een deel zal zoeter water vanaf het vaste land richting de polder stromen, maar daarvoor bevindt zich nog zout water. Voor een deel zal ook het zoutere water van onder het IJsselmeer naar de polder stromen. De Eemklei zorgt lokaal voor een goede afdichting tussen het 1^e en 2^e watervoerende pakket, maar komt niet overal voor. Waar de Eemklei ontbreekt kan zoute kwel omhoog komen.

Onzekerheden

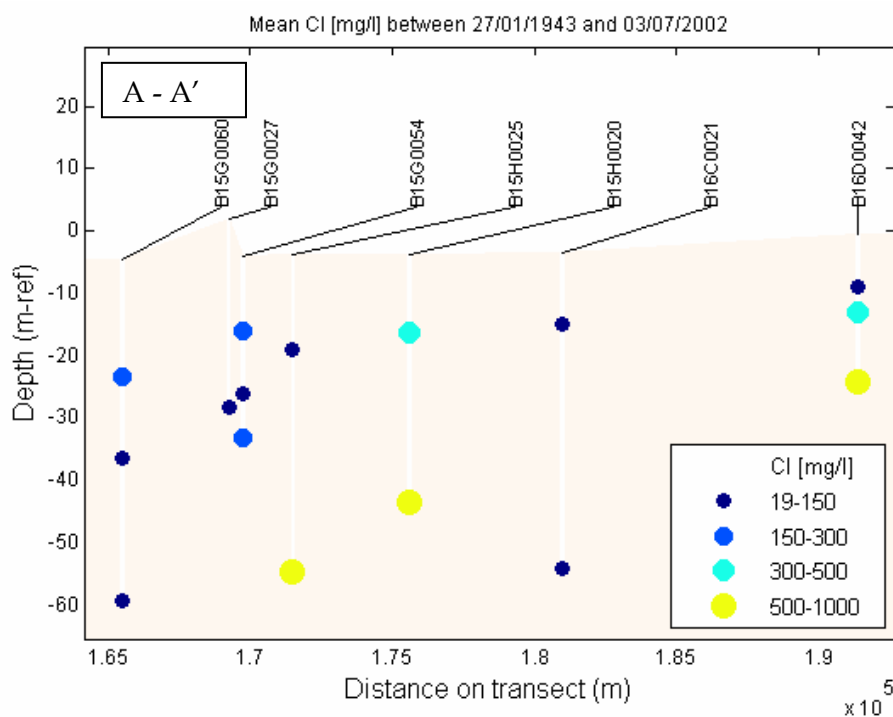
In de vorige paragraaf is al aan de orde gekomen dat op een aantal plaatsen nog veranderingen in het chloridegehalte gemeten worden. Dit betekent dat er nog geen evenwicht is. Slechts op twee locaties in de Noordoostpolder is de afgelopen jaren gemeten. Dit is te weinig om uitspraken over de hele polder te doen. Voor een beter beeld zouden alle meetpunten nogmaals gemeten moeten worden.

Mogelijkheden voor drinkwaterwinning

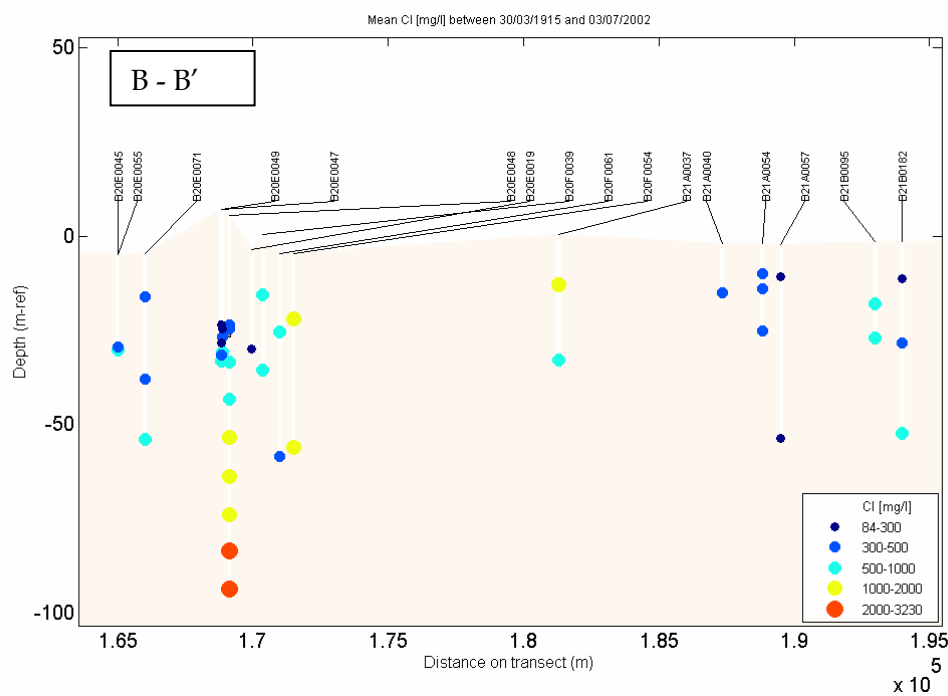
Onder de Noordoostpolder kan geen zoet water gewonnen worden. Lokaal is wel zoet water aanwezig, maar dit zijn kleine hoeveelheden die snel uitgeput zouden zijn.



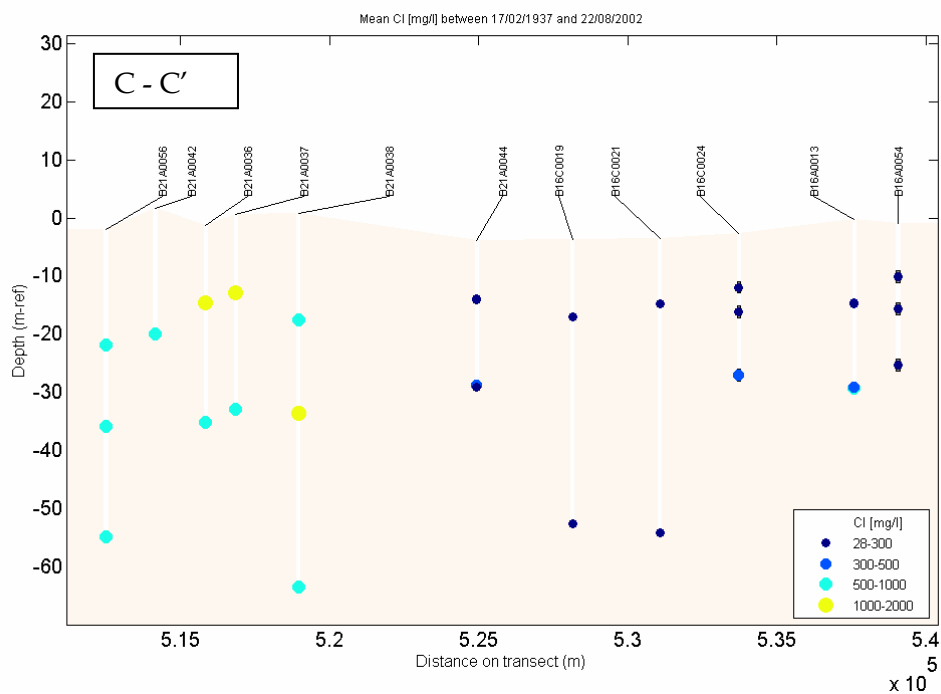
Figuur 9 Locatie van de dwarsprofielen



Figuur 10 Chlorideconcentraties geprojecteerd langs dwarsprofiel A – A'



Figuur 11 Chlorideconcentraties geprojecteerd langs dwarsprofiel B - B'



Figuur 12 Chlorideconcentraties geprojecteerd langs dwarsprofiel C - C'

Uit bovenstaande beschrijving blijkt dat de zoutconcentraties in het horizontale vlak ruimtelijk tamelijk variabel zijn. In het verticale vlak bestaan lokaal inversies van de zoutgradiënt maar in het algemeen neemt de zoutconcentratie geleidelijk toe met de diepte. Uit berekening van de BEX (base-exchange index) volgens Stuyfzand blijkt dat in de bovenste 40 meter onder het IJsselmeer verzoeting gaande is, terwijl over dit traject onder de Noordoostpolder juist verzilting optreedt. Dit fenomeen is een gevolg van de aanleg van de Afsluitdijk (1932) en de IJsselmeerpolders. Daardoor stroomt brakwater vanuit de tijd van de Zuiderzee onder invloed van de hydraulische gradiënt geleidelijk richting de Noordoostpolder.

3 Opzet van het instrument Optiwin

3.1 Twee sporen

De functionaliteit van het instrument kent twee sporen, het scenariospoor en het optimalisatiespoor. Het eerste spoor heeft betrekking op het doorrekenen van één enkele *productieconfiguratie*, het tweede spoor biedt de mogelijkheid om met behulp van de optimalisatiemodule te zoeken naar interessante alternatieve productieconfiguraties. Een productieconfiguratie is de vorm waarin de drinkwatervoorziening in een gebied plaats kan vinden, bestaande uit één of meerdere vraagpunten, pompstations, zuiveringinstallaties, reinwaterkelders en een transportnetwerk, waarbij van elk onderdeel de locaties, capaciteiten en debieten zijn vastgesteld.

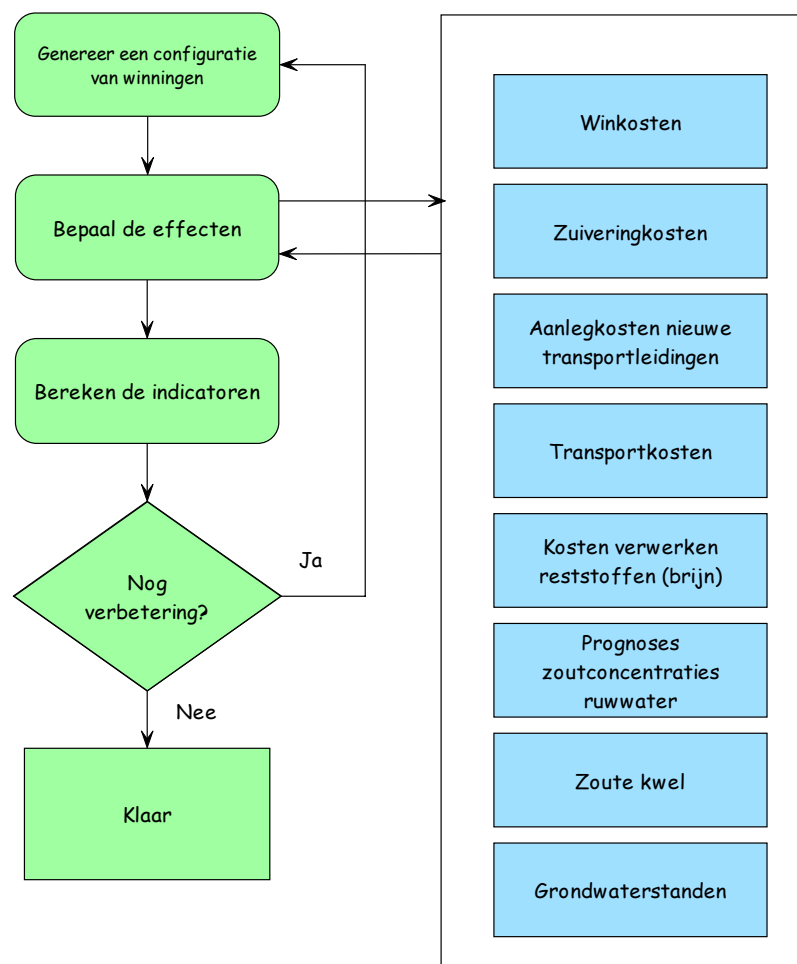
Bij gebruik volgens het eerste spoor, het scenariospoor, definieert een gebruiker een productieconfiguratie en berekent m.b.v. het instrument de relevante effecten. Effecten worden berekend met de modellen die door de gebruiker geselecteerd zijn. Met de modellen wordt bijvoorbeeld berekend wat de effecten zouden zijn van een klimaatscenario, samenvoeging van voorzieningsgebieden, invoering van een technologische vernieuwing, of van een stapsgewijze vervanging van transportleidingen. Ook berekening van effecten op de omgeving als gevolg van wijzigingen in productieconfiguraties vormt onderdeel van de functionaliteit.

Bij gebruik volgens het tweede spoor, het optimalisatiespoor, ligt de productieconfiguratie niet van tevoren al vast, maar wordt voor een deel nog open gehouden, door bijvoorbeeld in plaats van vaste locaties van productiemiddelen zoekgebieden te definiëren. De gebruiker definieert in dit geval geen productieconfiguratie, maar in plaats daarvan randvoorwaarden waaraan alternatieve configuraties moeten voldoen. De optimalisatiemodule van het instrument genereert dan een groot aantal configuraties die voldoen aan de door de gebruiker ingestelde randvoorwaarden. Van elke configuratie worden de effecten berekend en worden de prestaties geclassificeerd op basis van Pareto-efficiëntie¹. De gebruiker kan naderhand de eigenschappen van de verschillende configuraties en de bijbehorende effecten inspecteren. De resultaten worden gevisualiseerd in de vorm van kaarten, tabellen en grafieken. Op grond van de resultaten kan een bepaalde configuratie meer in detail door de gebruiker worden geanalyseerd, of er kan een nieuwe optimalisatie worden gestart met gewijzigde randvoorwaarden.

Het voordeel voor de gebruiker bij het eerste spoor is dat bedrijfseconomische, technische en andere 'effecten' van productieconfiguraties snel inzichtelijk zijn. Bij gebruik volgens het tweede spoor kan het instrument ook worden gebruikt om interessante alternatieve configuraties te identificeren en de effecten ervan te berekenen.

¹ Zie paragraaf 3.6 "Optimalisatiemodule"

Effecten van alternatieve bronnenkeuzen, zuiveringsscenario's en transportvarianten kunnen in een ruimtelijk gedifferentieerde context worden beoordeeld op leveringszekerheid, kwaliteit, kosteneffectiviteit, ecologische effecten, flexibiliteit, bestuurlijk draagvlak, of andere effectcategorieën waarvoor een effectmodel is geformuleerd. Het instrument heeft een modulaire structuur, zodat gemakkelijk effectmodellen kunnen worden toegevoegd of weggelaten, afhankelijk van de aard van de uit te voeren studies. Voor de criteria die de haalbaarheid van alternatieven bepalen worden indicatoren gekozen die een geschikte maatlat vormen om prestaties weer te geven. De indicatoren worden berekend met de effectmodellen. Sommige modellen moeten nog worden gemaakt, maar diverse zijn al beschikbaar of kunnen snel worden gebouwd op basis van rekenregels die geformuleerd tijdens eerdere fasen van het Flexwaterproject.



Figuur 13 Stroomschema van het voor deze studie ontwikkelde instrument Optiwin

3.2 ArcGIS modelbuilder

Voor de ontwikkeling van het instrumentarium is een opzet gekozen waarbij enerzijds interactief, anderzijds met een optimalisatiemodule kan worden gerekend aan de effecten van een brakwaterwinning. De interactieve mogelijkheid is ontwikkeld in ArcGIS, waarbij gebruik is gemaakt van de zgn. Modelbuilder module (Figuur 15). De gebruiker kan op interactieve wijze in het GIS een locatie en onttrekking specificeren en vervolgens worden de effecten van dit scenario binnen maximaal enkele minuten berekend en gevisualiseerd.

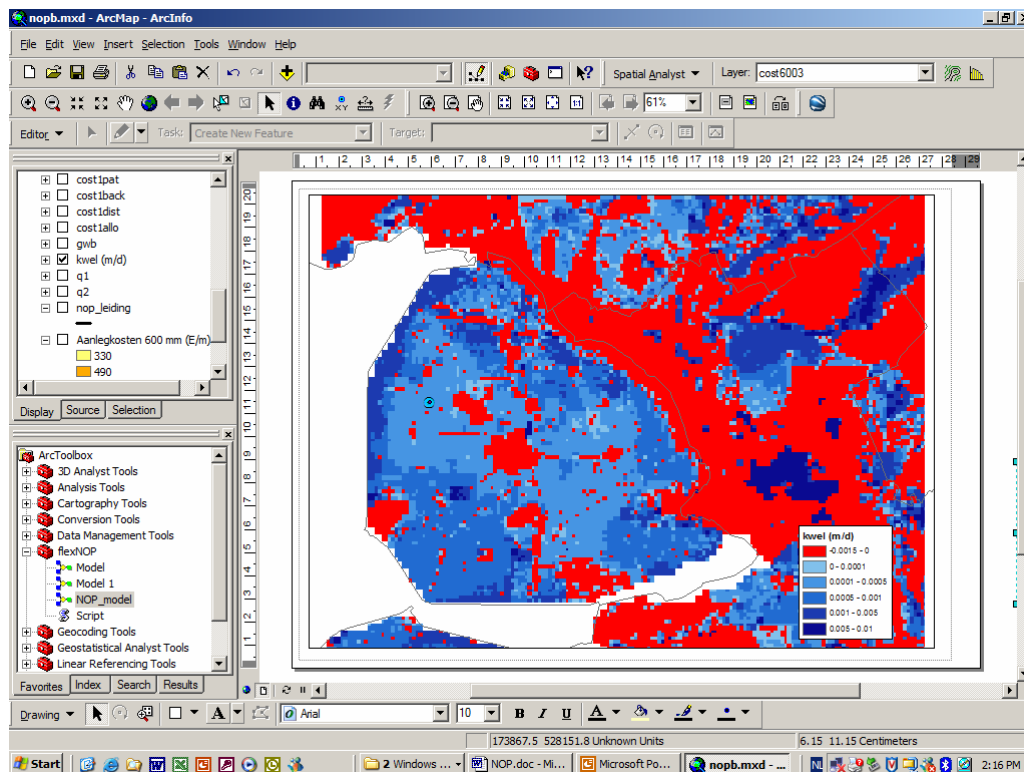
Op deze wijze is het mogelijk een interactie te krijgen van zowel GIS rekenprocessen als externe rekenprocessen. Groot voordeel is dat het wijzigen en beheren van de modelinvoer en uitvoer geheel via een standaard GIS omgeving verloopt. Hierbij gaat het naast geografische data (vector en grid bestanden) ook om tabellen en los in te voeren parameterwaarden. Via standaard GIS functies kan een locatie voor een nieuwe winning worden 'geprikt', (Figuur 14). Het model kan dan worden opgestart en via een model-interface kan het gewenste debiet voor de winning worden ingevuld, zie Figuur 16 en Figuur 17. Ook kunnen 'default' instellingen (bijv. recovery, rentevoet, grondwaterbelasting) worden gewijzigd. De modelresultaten worden weer direct in het GIS ingelezen en getoond in kaarten en grafieken zoals in Figuur 17. In de huidige opzet worden de benodigde tijdelijke uitwisselings- en stuurbestanden (dbf en txt) in een vaste directory opgeslagen.

3.2.1 Modelstappen

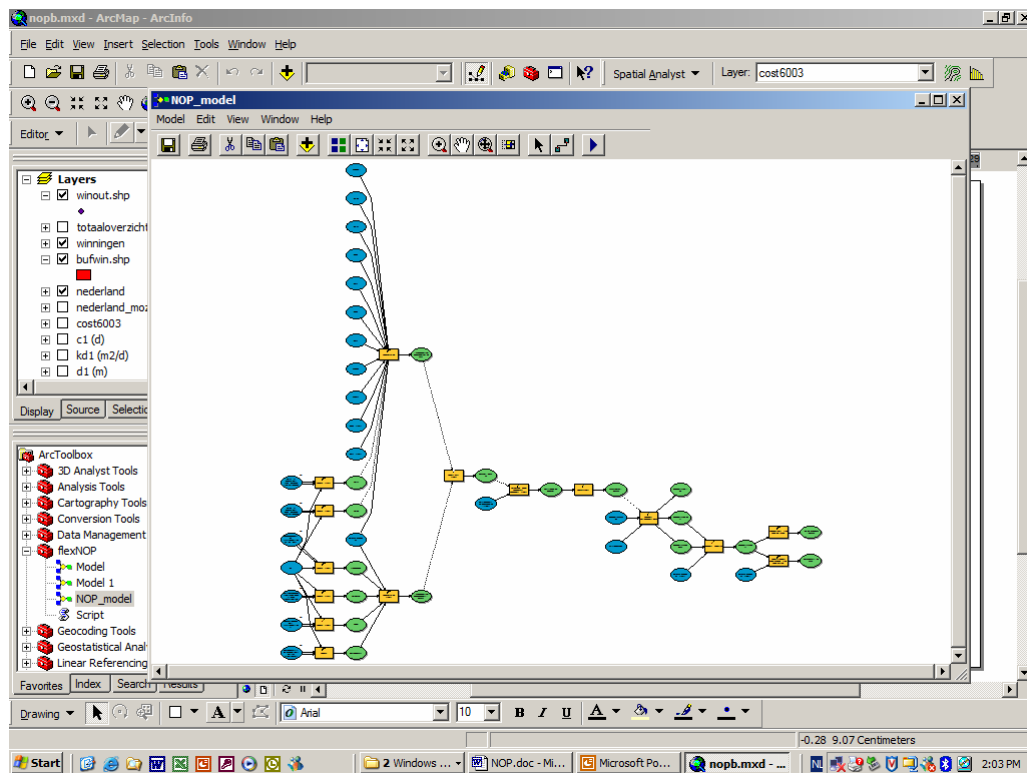
- 1) Verplaats de punt op het scherm die de winning weergeeft naar een te evalueren locatie met de ArcGIS edit functie (Figuur 14);
- 2) Open de model-builder tool en vul parameters in (debiet, rentevoet, afschrijvingstermijn) (Figuur 16);
- 3) Run het modelbuilder-model "FlexNOP". Hierin worden de volgende processen uitgevoerd:
 - a. Eerst wordt de ondergrond 'gesampled' (Kd en C waarden, pakkettendikten, kwel), hier worden invoerbestanden van gemaakt voor de externe effectmodellen (executables);
 - b. De effectmodellen worden achtereenvolgens aangeroepen en uitvoer wordt in ASCII text files weggeschreven;
 - c. Uitvoerbestanden (txt-files) worden als puntenbestanden, of als bronbestand voor de doorbraakcurve ingelezen in ArcGIS;
 - d. Er wordt een 5 cm verlagingscontour aangemaakt (buffer met een met het effectmodel berekende straal);
 - e. Op basis van het onderliggende kostengrid wordt het beste tracé bepaald voor een transportleiding naar het noordelijkste deel van de NO-polder. De ligging van dit aansluitingspunt is uiteraard ook te wijzigen.

3.2.2 Modeluitvoer

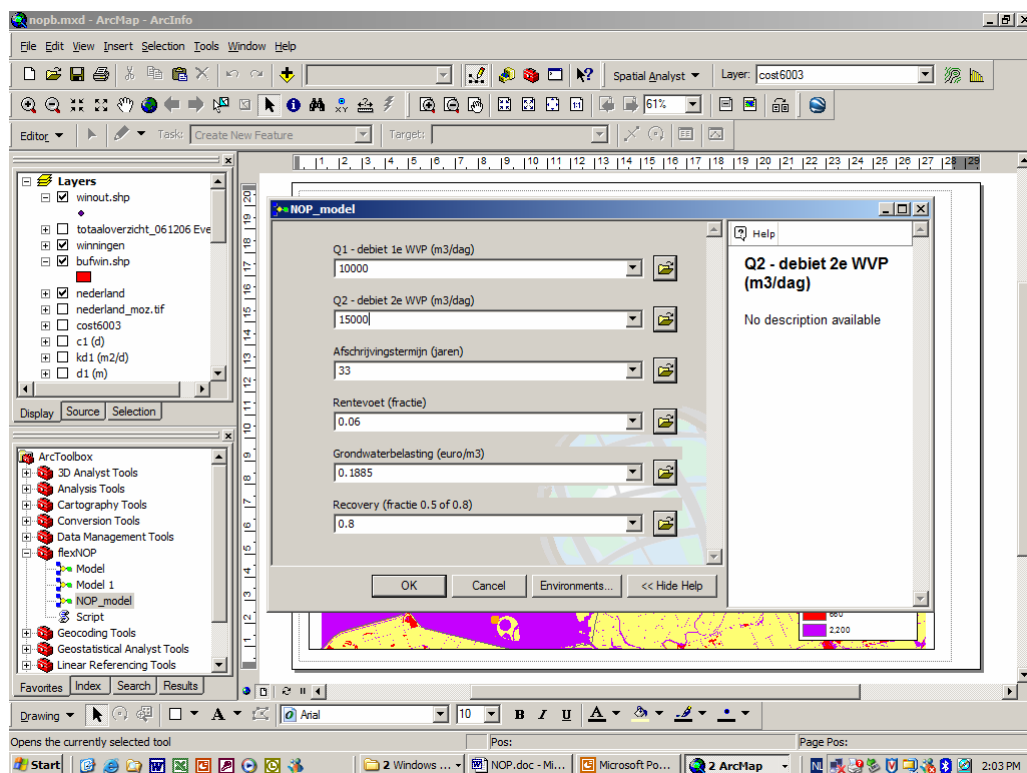
Met de 'refresh' button in ArcGIS worden de resultaten direct in beeld gebracht. Hierbij gaat het dus om de globale 5 cm verlagingscontour, de doorbraakcurve en het transportleidingtracé. Daarnaast zijn de andere resultaten (totale zoutlast, investeringskosten, zuiveringskosten) als attributen gekoppeld aan de winning en kunnen dus ook worden gevisualiseerd in kaart- of grafiekvorm. Zie ook Figuur 17.



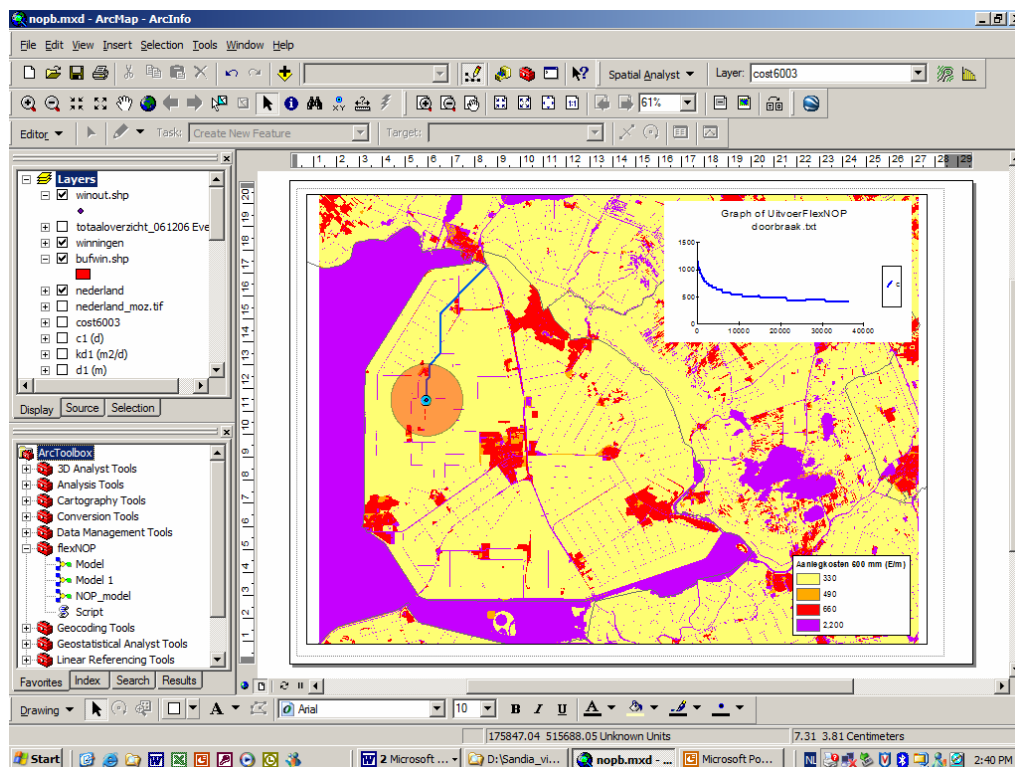
Figuur 14 Voorbeeldinvoer voor NOP model; hypothetische locatie winning en kwel/infiltratiebeeld.



Figuur 15 Het model voor de Noordoostpolder in ontwerpmodus.



Figuur 16 Invoerdialogoog van het instrument.



Figuur 17 Visualisatie van de resultaten van het NOP model. - De oranje cirkel toont de verwachte 5 cm verlagingsgrens rond de ontrekkingslocatie. De achtergrond van de kaart geeft de aanlegkosten van een hoofdtransportleiding per lengte-eenheid weer; de blauwe lijn in de kaart geeft het berekende optimale tracé van de leiding weer. De grafiek toont de prognose van de concentratie chloride in het ruwwater. Met een druk op de knop worden de effecten berekend die corresponderen met een door de gebruiker geselecteerde productieconfiguratie.

3.3 Effectmodellen hydrologie en hydrochemie

De Noordoostpolder is gekozen als studiegebied voor de ontwikkeling van een beslissingsondersteunend model om de kansrijkheid van de winning van brak grondwater te verkennen. In dat kader is het nodig analytische uitdrukkingen te ontwikkelen en te programmeren, zodat deze als effectmodellen inzetbaar zijn in een GIS-omgeving. Met de effectmodellen kunnen de volgende aspecten van een grondwaterwinning gekwantificeerd worden:

- effect op de grondwaterstand (indicator van verdroging);
- reductie van kwel en daarmee van de zoutlast van de Noordoostpolder;
- ontwikkeling van te verwachten chlorideconcentratie in het ruwwater.
- netto contante waarde van de win- en zuiveringskosten;
- optimaal tracé voor het koppelen van de winning aan het transportnetwerk.

De locatie van de winning is variabel ("wandeland pompstation").

Geohydrologisch schema

Zoals blijkt uit de Grondwaterkaart, de Landelijke Hydrologische Systeemanalyse en REGIS kan de ondergrond van de Noordoostpolder geschematiseerd worden tot twee watervoerende lagen, gescheiden door en afgedekt door slecht doorlatende lagen. In de bovenste, afdekkende laag wordt de grondwaterstand gehandhaafd door middel van sloten en drains. Zoals blijkt uit de bodemkaarten bestaat de bodem vooral uit lichte tot zware zavel en verslagen veen. Er is dus geen freatische aquifer.

Rekenschema

Het rekenschema is ontworpen voor twee aquifers, gescheiden door slecht doorlatende lagen. In de bovenste scheidende laag is uitgegaan van een vast grondwaterpeil, dat gehandhaafd wordt via het oppervlaktewaterpeil. Resultaat van de berekening is de uiteindelijke, stationaire verlagingstoestand die behoort bij een puntvormige onttrekking die langdurig op een constant winningsniveau bedreven wordt.

Verlagingen

Om verlagingen van de stijghoogten te berekenen is voor deze situatie de zogenaamde formule van Huisman/Kemperman beschikbaar. Deze formule is later gegeneraliseerd tot een willekeurig aantal aquifers door Hemker en door Maas. De oplossing van Maas heeft het voordeel dat hij in termen van matrixfuncties geformuleerd is, waarmee een programma als Matlab gemakkelijk overweg kan. De uitdrukking luidt

$$\varphi(r) = \frac{1}{2\pi} K_0(r\sqrt{A})(Q./kD) \quad (1)$$

φ , Q en kD zijn vectoren met evenveel elementen als er aquifers zijn. φ (m) bevat de stijghoogten in de verschillende aquifers op afstand r (m) van de put, Q (m³/d) bevat de onttrekkingen aan de verschillende aquifers en kD (m²/d) bevat de doorlaatvermogens. A is een vierkante matrix, die net zo lang en breed is als er aquifers zijn. Ik noem hem de systeemmatrix. Voor een systeem van vier aquifers ziet hij er als volgt uit:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{kD_1c_1} + \frac{1}{kD_1c_2} & -\frac{1}{kD_1c_2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{kD_2c_2} & \frac{1}{kD_2c_2} + \frac{1}{kD_2c_3} & -\frac{1}{kD_2c_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{kD_3c_3} & \frac{1}{kD_3c_3} + \frac{1}{kD_3c_4} & -\frac{1}{kD_3c_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{kD_4c_4} & \frac{1}{kD_4c_4} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Hieruit is wel af te leiden hoe A voor het algemene geval van n -aquifers is opgebouwd. De c -waarden (d) in (2) zijn de weerstanden van de scheidende lagen. De basis is ondoorlatend ($c_{n+1} = \infty$). Meer informatie over (1) is te vinden in (Maas en Olsthoorn, 1997).

Verdroging

Verdroging kent twee aspecten: een daling van de grondwaterspiegel en een afname van de kwelflux (zie paragraaf 3). De grondwaterspiegel wordt door (1) niet expliciet berekend. Om die te kunnen bepalen moet een verdere schematisering van de afdekkende slechtdoorlatende laag doorgevoerd worden. Er zijn twee drainageniveaus te onderscheiden: het niveau van de buisdrains en het niveau van de waterlopen. Als de stijghoogte in de bovenste aquifer daalt, daalt de (freatische) grondwaterspiegel ook, maar niet zo sterk. Het niveau van de sloten daalt praktisch gesproken niet.

Er bestaat veel discussie over de betekenis van de weerstand (c -waarde) van de afdekkende laag. In dit geval is het niet zo moeilijk, doordat uitsluitend de bijdrage van een onttrekking berekend hoeft te worden. Daarom kan de neerslag buiten de berekening gehouden worden. Als er een peilverschil bestaat tussen de bovenste aquifer en de sloten, dan treedt er een flux q (m/d) op, die evenredig is met het peilverschil. De evenredigheidsconstante is de *voedingsweerstand* c_v (d)

$$c_v = \frac{p - \varphi}{q} \quad (3)$$

Hierin is p (m) het slootpeil en φ (m). Als de stijghoogte in de bovenste watervoerende laag lager is dan het slootpeil, zal de grondwaterspiegel in de afdekkende laag ook lager zijn, maar minder. De flux (dezelfde) is dus ook evenredig met het peilverschil tussen de sloot en de freatische grondwaterstand. Deze evenredigheidsconstante is de *drainageweerstand* c_d (d):

$$c_d = \frac{p - \varphi_f}{q} \quad (4)$$

Hierin is ϕ_f de ruimtelijk gemiddelde grondwaterstand in de afdekkende laag. Beter gezegd: het is de ruimtelijk gemiddelde daling van de grondwaterstand ten gevolge van de daling van de stijghoogte in de bovenste watervoerende laag. Deze freatische daling is van belang om de invloed van een winning ten aanzien van verdroging te kwantificeren.

Kwel en infiltratie

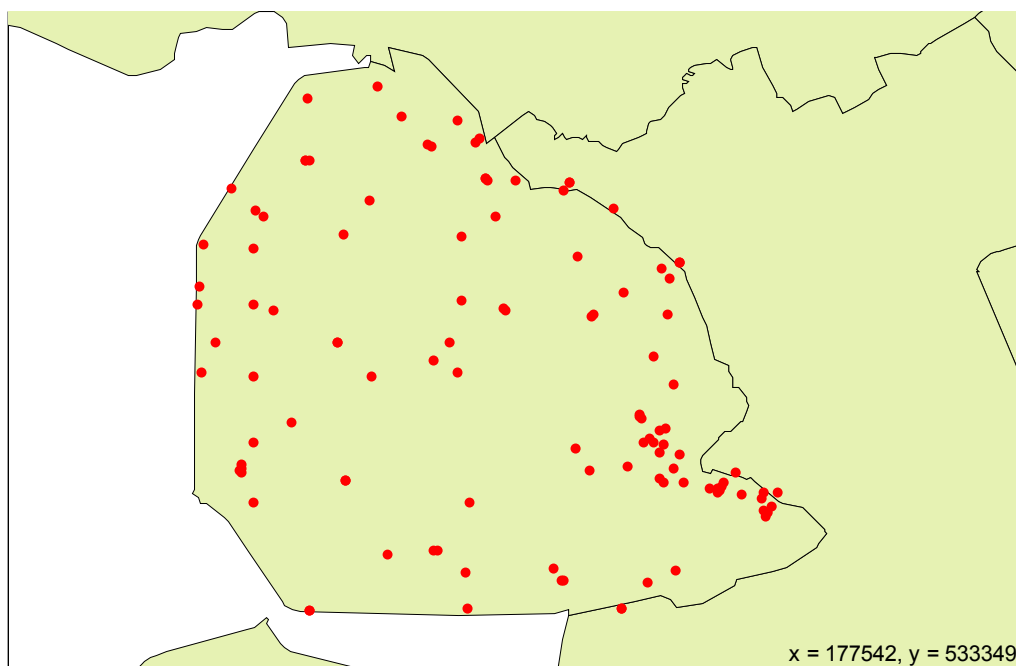
De flux q in (3) en (4), is de (verandering van) kwel of infiltratie. Verandering van kwel is - samen met de daling van de grondwaterstand - van belang om de verdrogende invloed van een winning in te schatten. Als er sprake is van een zoutbelasting, en de kwel neemt af ten gevolge van grondwaterwinning, dan neemt de zoutvracht af met

$$Z = q Cl \quad (5)$$

Hierin is Z (kg/m²/d) de afname van de zoutvracht, q (m/d) is de afname van de kwelflux, en Cl (kg/m³) is het chloridegehalte van het kwelwater. Om de totale afname van de zoutvracht te vinden moet Z geïntegreerd worden over het invloedsgebied van de winning. Als er binnen het winningsgebied geen ruimtelijke differentiatie is in zoutgehalte van de bovenste aquifer, dan is de afname van de zoutlast eenvoudigweg gelijk te stellen aan het putdebiet maal het chloridegehalte van de bovenste aquifer. Er zijn echter wel ruimtelijke verschillen.

Bodemparameters

De doorlaatvermogens van de aquifers en de weerstand van de scheidende laag kunnen waarschijnlijk ontleend worden aan bestaande grondwatermodellen. De voedingsweerstand c_v is wellicht ook aan grondwatermodellen te ontleen, maar tijdreeksanalyse met Menyanthes vormt een onafhankelijk alternatief. Voor de bepaling van de voedingsweerstand zijn gegevens van alle peilbuizen in de Noordoostpolder die in DINO beschikbaar zijn binnengehaald. Het blijken er 117 te zijn (Figuur 18). Helaas zijn er geen echte freatische filters bij, dus de drainageweerstand c_d , waarom het eigenlijk gaat, is niet op deze manier te vinden. Wellicht is er iets uit grondwatermodellen af te leiden, maar als er geen freatische waarnemingen zijn kunnen die waarden niet veel beter zijn dan een slag in de lucht. Er rest niet veel beters dan aan te nemen dat de drainageweerstand een bepaalde fractie is van de voedingsweerstand.



Figuur 18 Locaties van peilbuizen met stijghoogtegegevens die in Dino beschikbaar zijn

Ruwwaterkwaliteit

De ruwwaterkwaliteit wordt aanvankelijk bepaald door de grondwaterkwaliteit in de onmiddellijke omgeving van de onttrekking. De kwaliteit zal geleidelijk verlopen, maar het verloop is afhankelijk van vrij veel factoren, die zich niet gemakkelijk laten vangen in een vuistregelachtige formule. Het hier gepresenteerde rekenschema is een vereenvoudigde versie van het programma Vlugzout (Maas en Schaars, Vlugzout is onderdeel van Kiwa Water Ware). Vlugzout is gemaakt om de ontwikkeling van het zoutgehalte in ruwwater in de tijd te voorspellen. Het is gebaseerd op formule (1), maar het vereist een numerieke particle tracking, wat per winlocatie al gauw een paar minuten vergt. Voor de vigerende toepassing is een vereenvoudiging toegepast om rekentijd te besparen zodat er per locatie maar eenmaal een doorbraakkromme van chloride berekend hoeft te worden. Met een eenmalige berekening per locatie kan worden volstaan omdat de snelheid van doorbraak vrijwel uitsluitend afhangt van het debiet van de put. De schaling van de tijd hangt af van het debiet.

Benodigde gegevens

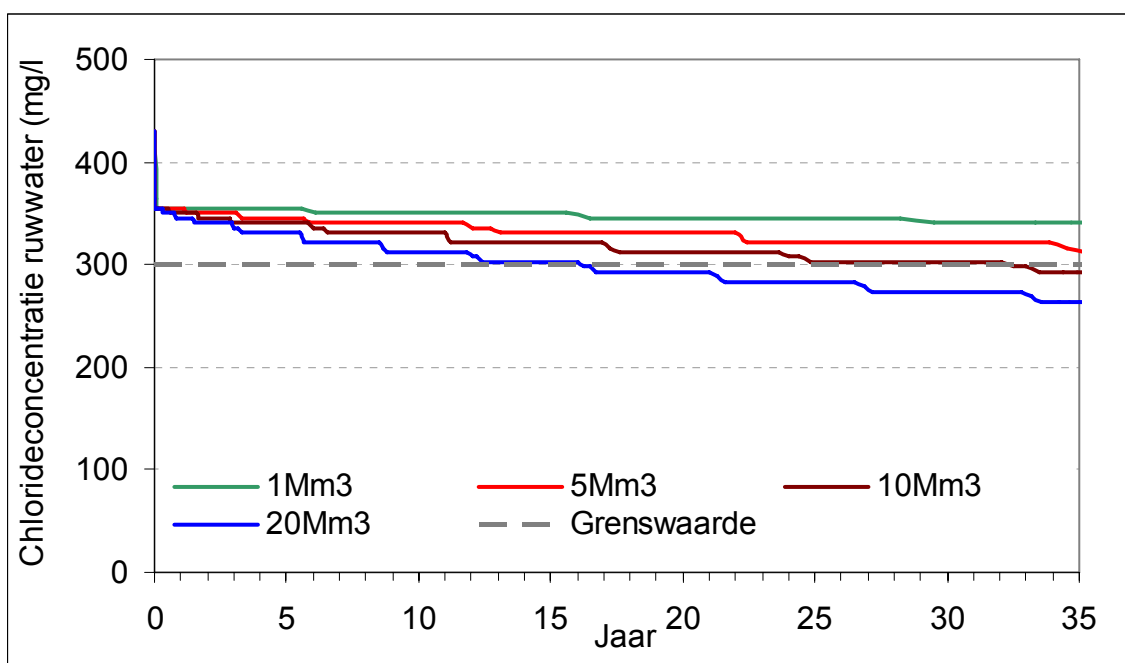
De volgende gegevens zijn nodig:

- locatie van de put;
- debiet in het eerste watervoerende pakket;

- debiet in het tweede watervoerende pakket;
- doorlaatvermogens van de aquifers (uit grondwatermodellen);
- voedingsweerstand van de afdekkende laag (zie discussie hierboven);
- drainageweerstand (uit grondwatermodellen en/of tijdreeksanalyse);
- weerstand van de scheidende laag (uit grondwatermodellen);
- chloridegehalte van het kwelwater, of van het bovenste deel van de aquifer;
- 3-D chlorideprofielen;

Het resultaat van de berekeningen bestaat uit:

- doorbraakkromme chlorideconcentratie;
- verlaging van de grondwaterstand;
- reductie van de zoutlast.



Figuur 19 Voorbeeld van doorbraakkrommen berekend met de vereenvoudigde versie van 'Vlugzout'. Naarmate meer grondwater wordt onttrokken treedt eerder verzoeting op.

3.4 Effectmodel zuiveringskosten

In de Noord-Oostpolder is het grondwater grotendeels brak. Er zijn verschillende scenario's voor het winnen van brak grondwater om er drinkwater van te maken. Wat betreft het zuiveren, ligt het voor de hand omgekeerde osmose te gebruiken. De zouten worden grotendeels tegengehouden door het membraan, zodat het membraanpermeaat nagenoeg geen zouten bevat. De zoute afvalwaterstroom die hierbij ontstaat, wordt

concentraat genoemd. De in het water aanwezige gassen (methaan) en andere kleine stoffen die het membraan kunnen passeren (ammonium) kunnen met beluchting en/of snelfiltratie worden verwijderd. De kostenbepalende stap is de omgekeerde osmose en de daaraan gekoppelde verwerking of lozing van het membraanconcentraat.

Bij het zoeken naar een geschikte locatie zijn de chemische samenstelling (zouten) van het grondwater en de mogelijkheden voor het lozen van membraanconcentraat dan ook de belangrijkste factoren die de kosten en haalbaarheid van een brak grondwater winning beïnvloeden.

De zoutconcentratie (NaCl) is niet op alle plaatsen gelijk en varieert van 300 tot 5000 mg Cl/l. Hoe hoger de totale concentratie aan zouten, des te hoger is de osmotische waarde van het voedingswater van de membraaninstallatie. Hierdoor is meer energie nodig om dezelfde hoeveelheid water door het membraan te persen. Als verwacht wordt dat in de loop van de tijd de zoutconcentraties op gaan lopen, dan dient hier bij de bouw van de installatie rekening mee gehouden te worden.

Scaling

Doordat ionen worden tegengehouden door het membraan, nemen de concentraties toe. Bij overschrijding van het oplosbaarheidsproduct en aanwezigheid van entmateriaal (kristallen van hetzelfde of aanverwant zout) slaan (anorganische) zouten neer. Scaling bestaat vaak uit calciumcarbonaat, calciumsulfaat, bariumsulfaat of silicaat (SiO₂), omdat deze zouten een laag oplosbaarheidsproduct hebben. Scaling kan worden voorkomen door de zouten maar in beperkte mate te concentreren in het concentraat. Dit betekent dat uit 1 m³ opgepompt water bijvoorbeeld 0,5 m³ permeaat (wordt drinkwater) wordt geproduceerd en 0,5 m³ concentraat. Dit noemen we een recovery van 50%. De recovery is gedefinieerd als het permeaatdebiet gedeeld door het voedingsdebiet * 100%. Door een zuur (zwavelzuur of zoutzuur) te doseren of een anti-scalant, kan een hogere recovery (circa 80%) worden behaald zonder dat scaling optreedt. Bij een hogere recovery hoeft minder water te worden opgepompt en geloosd en voldoet een kleinere omgekeerde osmose installatie. Diverse chemicaliënproducenten hebben anti-scalants ontwikkeld, bijvoorbeeld op basis van fosfaten en polymeren. Welke anti-scalant het beste gebruikt kan worden is afhankelijk van de precieze samenstelling van het water en het membraantype. Door middel van projectieberekeningen kan voor een bepaald membraantype worden berekend welke recovery haalbaar is, gegeven de watersamenstelling. Omdat de recovery van de omgekeerde osmose installatie erg bepalend is in de zuiveringskosten én voor de grootte van de installatie, zal vooraf bekeken moeten worden in hoeverre de grondwatersamenstelling ten aanzien van scalende ionen in de loop van de tijd zal wijzigen.

Reststoffen

De mogelijkheden voor het lozen van het membraanconcentraat bepalen of brak grondwater gewonnen kan worden op een bepaalde locatie. Allereerst dient met overheden te worden overlegd of mag worden geloosd op het riool (kan meestal alleen met kleine hoeveelheden) of dat een vergunning verkregen kan worden voor lozing op een nabijgelegen oppervlaktewater. Er

zal aannemelijk gemaakt moeten worden dat de lozing de kwaliteit van het water slechts in beperkte mate beïnvloedt. Als geen vergunning voor lozing op riool of oppervlaktewater kan worden verkregen, dan is het mogelijk met de provincie te overleggen of een ontheffing kan worden verkregen op het verbod van lozing in de bodem. Het concentraat wordt dan dicht bij de locatie weer geïnfiltreerd, bijvoorbeeld in een watervoerend pakket met een vergelijkbare zoutconcentratie (NaCl) als het membraanconcentraat. Over de wet- en regelgeving omtrent concentraatlozing en over praktijkervaringen zijn verschillende BTO-rapporten en artikelen (o.a. van Vitens) verschenen. Aangenomen wordt dat bij diepinfiltratie van het concentraat in de bodem het niet toegestaan zal worden een anti-scalant te doseren, zodat maximaal een recovery van ongeveer 50% kan worden gehaald. Overigens zijn technologische oplossingen in ontwikkeling, waarmee het mogelijk moet zijn 99% recovery te halen, waarna de (kleinere) reststroom wordt ingedampt.

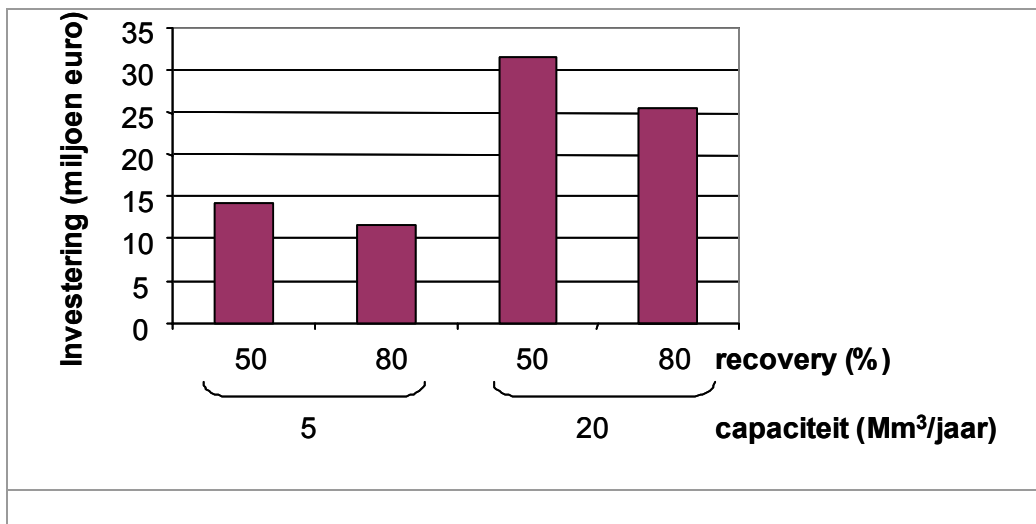
Kosten

Om een idee te krijgen van de kosten van het zuiveren van brak grondwater tot drinkwater, zijn voor verschillende scenario's investeringskosten en exploitatiekosten berekend. Er zijn drie variabelen gekozen, die in alle mogelijke combinaties zijn gevarieerd:

- reinwaterproductiecapaciteit (5 of 20 miljoen m³/jaar);
- recovery (50 of 80%);
- zoutconcentratie (300, 1000, 2500, 5000 mg Cl/l).

Bij de investeringen en exploitatiekosten is geen rekening gehouden met de kosten die moeten worden gemaakt voor verdere verwerking en/of lozing van het concentraat.

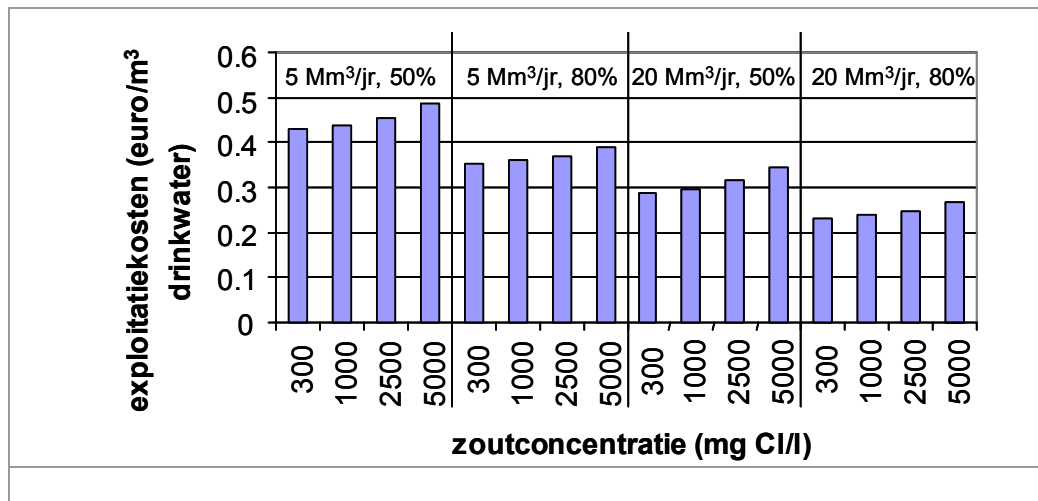
Aangenomen is dat er geen belasting wordt geheven over het opgepompte grondwater, omdat tot nu toe het winnen van brak grondwater onbelast is.



Figuur 20 Indicatieve investeringskosten voor het bouwen van een drinkwaterzuivering voor brak grondwater, voor twee waterproductiecapaciteiten en per capaciteit twee verschillende recoveries. Exclusief kosten voor verdere verwerking, lozing of infiltratie van membraanconcentraat.

Figuur 20 laat de kosten zien van het bouwen van een waterzuivering voor brak grondwater. Een grotere zuivering bouwen levert schaalvoordelen op, waardoor de totale investeringen minder dan evenredig met de productiecapaciteit toenemen. Wanneer een hogere recovery kan worden gekozen, hoeft minder water te worden gezuiverd en opgepompt om dezelfde hoeveelheid drinkwater te produceren. Zodoende volstaat een kleinere omgekeerde osmose installatie en bovendien hoeven minder winputten te worden aangelegd. De investeringen zijn onafhankelijk van de zoutconcentratie.

Omdat de investeringen lager zijn bij hogere recovery, zijn ook de afschrijvingen en dus de exploitatiekosten lager bij een recovery van 80%. Het energieverbruik is bij omgekeerde osmose aanzienlijk en afhankelijk van de zoutconcentratie. Omdat bij een recovery van 50% meer water op een hogere druk moet worden gebracht, nemen de kosten meer toe bij toenemende zoutconcentratie dan bij een recovery van 80%. Er lijken echter wel mogelijkheden te zijn om bij lage recoveries een deel van de energie terug te winnen.



Figuur 21 Exploitatiekosten van een drinkwaterzuivering voor brak grondwater, voor twee waterproductiecapaciteiten, per capaciteit twee verschillende recoveries en vier verschillende zoutconcentraties. Kosten voor verdere verwerking, lozing of infiltratie van membraanconcentraat zijn niet berekend.

Het verband tussen de zuiveringskosten, het debiet en de zoutconcentratie van het ruwwater is op basis van bovenstaande gegevens vertaald in gelineariseerde kostenfuncties voor beide geselecteerde recovery percentages, zodat “traploos” bij elk willekeurig debiet en zoutconcentratie de kosten per m³ bepaald kunnen worden. Vervolgens worden de kosten omgerekend naar de netto contante waarde, als functie van de gekozen rentevoet en levensduur.

3.5 Optimaal leidingtracé en effectmodel transportkosten

GIS Cost-path module – bepaling optimale leidingtracé

Deze module maakt gebruik van een standaard GIS analyse die is gebaseerd op grid functies. Uitgangspunt vormt een ‘kostengrid’, in dit geval is er gekozen voor de aanlegkosten van 1 meter transportleiding van 600 mm. Omdat deze kosten per meter afhangen van het landgebruik, is de invoer verkregen door een CBS landgebruikskaat te classificeren en naar het benodigde grid van 10x10 meter om te zetten, het grid bestaat uit 4420 kolommen en 3440 rijen. Deze gridresolutie is nodig om ook het effect van watergangen en wegen mee te kunnen nemen.

De Cost-path berekening gaat verder uit van een bron en een doel, in dit geval respectievelijk de hypothetische winningslocatie en een ‘uitgang’, een arbitrair gekozen punt in het noorden van de polder. Voor elk van de 15.204.800 cellen (4420 x 3440) wordt vervolgens uitgerekend hoeveel kosten/weerstand ermee gemoeid gaat om in de volgende buurcel te komen. In een speciaal grid wordt steeds bijgehouden wat de “weg van de minste

weerstand" is om van bron naar doel te komen. Op basis hiervan kan het optimale tracé worden bepaald.

In het kostengrid kunnen behalve aanlegkosten uiteraard meer factoren worden opgenomen, eventueel met weegfactoren. Ook kunnen bepaalde gebieden worden uitgesloten door ter plekke de kosten (weerstand) zeer groot te maken.

3.6 Optimalisatiemodule

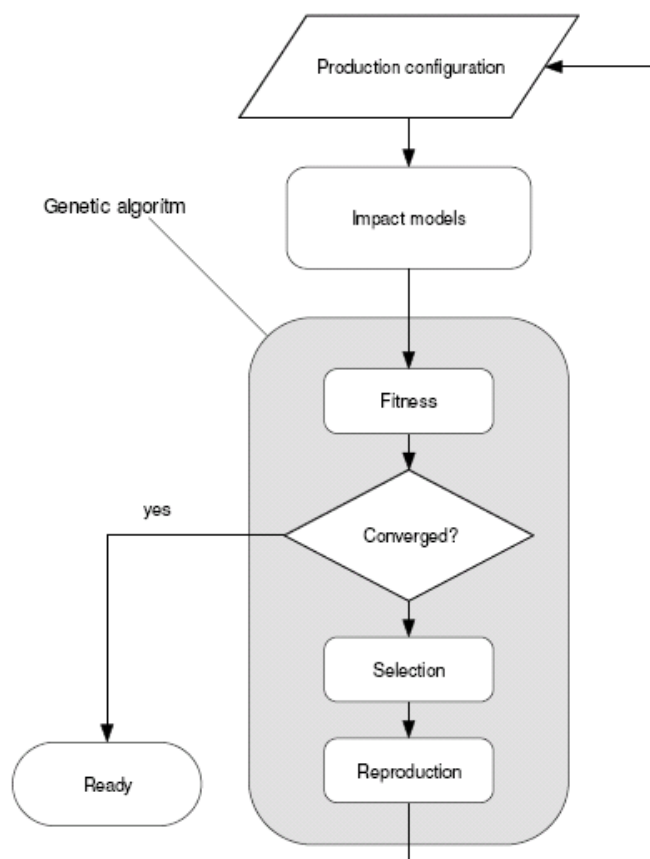
Voor het vinden van de beste locaties voor een brakwaterwinning is een optimalisatiemodule toegepast met als kern een genetisch algoritme (GA). De eerste genetische algoritmen zijn ontwikkeld in de jaren '70 van de vorige eeuw (Holland, 1975). Vanaf de jaren 90 is het aantal toepassingen snel toegenomen (Beasley, 1993). De ontwikkeling van genetische algoritmen is geïnspireerd op de genetische processen van organismen zoals Charles Darwin die als eerste verwoordde in zijn *The origin of Species*. Zoals bij Darwin de evolutie van soorten het onderwerp van studie is, zo worden in de theorie van genetische algoritmen mogelijke oplossingen voor optimalisatieproblemen als individuen, d.w.z. leden van een populatie beschouwd.

Drie beginselen uit Darwin's evolutieleer worden toegepast in genetische algoritmen:

- overleven van de sterksten
- (onvolledige) vererving van eigenschappen
- variatie van eigenschappen in populaties

Het eerste beginsel heeft niet alleen betrekking op het overleven van individuen, maar ook op de reproductie. De consequentie van het tweede beginsel is dat eigenschappen van nakomelingen lijken op die van hun "ouders", maar er ook wat van verschillen. Het derde beginsel zorgt voor een doorlopende variatie van eigenschappen van mogelijke oplossingen.

GA's werken met een populatie van meer of minder geschikte oplossingen voor een probleem. De "fitheid" van een oplossing wordt berekend, en de eigenschappen ("genen") van individuen die een relatief hoge fitheid bezitten worden gecombineerd met andere oplossingen, resulterend in nieuwe oplossingen. De reproductiecyclus wordt herhaald tot verdere verbetering van de fitheid stagneert.



Figuur 22 Stroomschema van de optimalisatieprocedure van een genetisch algoritme

Genetische algoritmen zijn bij uitstek geschikt voor optimalisatieproblemen met meerdere, conflicterende doelstellingen doordat er een populatie met oplossingen beschikbaar is. Deze populatie kan worden gepresenteerd in de vorm van een *Pareto front*.

3.6.1 Appels en peren: Pareto efficiëntie

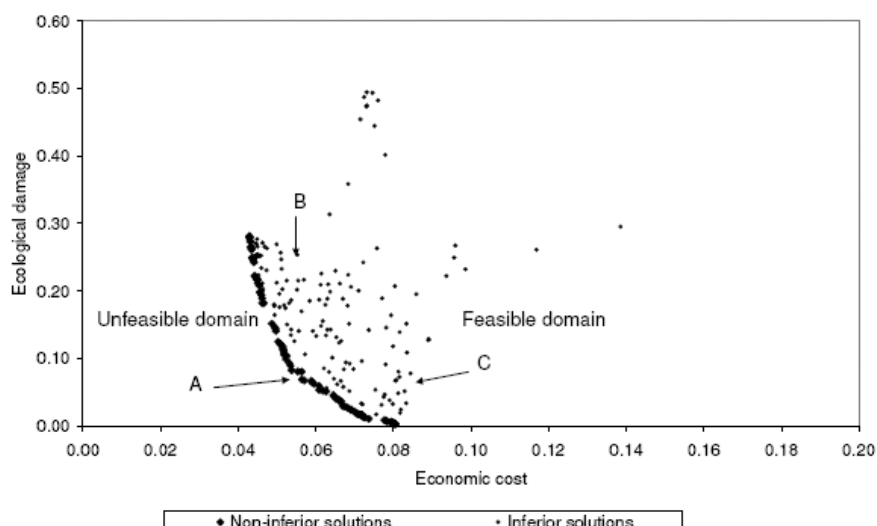
Bij optimalisatievraagstukken worden in de praktijk vaak meerdere doelen (criteria) nagestreefd. Als er slechts één doel bestaat (of meerdere, maar niet conflicterende doelen) is er sprake van een maximalisatievraagstuk (minimalisatievraagstuk). Conform de hierboven beschreven terminologie is er bij een optimalisatievraagstuk altijd sprake van meer dan één doel en bijbehorende indicator van effecten. De indicatoren zijn niet objectief converteerbaar en dus is er sprake van het bekende 'appels en peren' probleem. Mensen hebben de eigenschap op verschillende wijze de effecten te wegen en dus is het niet mogelijk een objectief optimum te identificeren. Wanneer er meerdere deelnemers bij de keuze betrokken zijn impliceert dit dat er communicatie, onderhandeling of stemming nodig is om tot een intersubjectieve beslissing te komen (keuzeprocess).

Al in het begin van de 20e eeuw heeft de politicoloog-econoom Pareto optimalisatievraagstukken met conflicterende doelfuncties bestudeerd. Hij

onderscheidde inferieure en non-inferieure oplossingen. De keuze tussen verschillende non-inferieure oplossingen kan niet objectief gemaakt worden, maar een inferieure oplossing zal nooit een objectief optimum kunnen zijn, de keuze voor een objectief inferieure oplossing is niet rationeel.

Een praktisch voorbeeld ter illustratie van het begrip Pareto efficiëntie is de aanschaf van een pakje thee in de supermarkt. Een goed gesorteerde supermarkt verkoopt verschillende soorten thee, met verschillende kwaliteiten en voor verschillende prijzen. Wanneer een potentiële koper moet kiezen tussen een duur pakje thee van zeer goede kwaliteit en een goedkoop pakje thee van een mindere kwaliteit, dan is deze keuze een kwestie van smaak. Het is niet mogelijk om op rationele gronden voor één van de beide alternatieven te kiezen. Wanneer er echter ook een pakje thee wordt aangeboden van mindere kwaliteit voor een gelijke of hogere prijs, dan kan op objectieve gronden besloten worden de betreffende optie te verwerpen; geen rationeel mens zal ervoor kiezen meer geld uitgegeven zonder daarvoor in kwaliteit gecompenseerd te worden. Keuzemogelijkheden die bij voorbaat al op rationele gronden verworpen kunnen worden staan in de Pareto terminologie bekend als “inferieur”, of “gedomineerd”.

Non-inferioriteit is een relatieve eigenschap: een oplossing is non-inferieur (Pareto efficiënt, ‘non-dominated’) als binnen de oplossingruimte geen andere oplossing te vinden is die beter scoort op tenminste één indicatorwaarde zonder op de andere indicatorwaarden slechter te scoren. De techniek kan het keuzeproces dus ondersteunen door alleen non-inferieure oplossingen aan te bieden bij een keuzeproces. Wanneer bij een optimalisatievraagstuk met twee conflicterende doelen de beide indicatorwaarden van de oplossingen op een grafiek worden uitgezet op de x en y as, dan vormen de Pareto-efficiënte oplossingen samen het Pareto-front.



Figuur 23 Voorbeeld van een populatie oplossingen met een Pareto-front

In Figuur 23 is oplossing *A* Pareto-efficiënt omdat er geen andere oplossing bestaat die zowel lagere economische kosten met zich meebrengt als lagere ecologische schade. Oplossing *B* brengt gelijke economische kosten met zich mee als oplossing *A*, maar veroorzaakt meer ecologische schade. Oplossing *C* brengt gelijke ecologische schade met zich mee als oplossing *A*, maar veroorzaakt hogere economische kosten. Gegeven de mogelijkheid van oplossing *A* is een keuze voor oplossing *B* of *C* niet rationeel en dus *objectief* te verwerpen. Er kan bij een optimalisatievraagstuk met meerdere, tegenstrijdige doelen dus een preselectie worden uitgevoerd op de mogelijke oplossingen.

4 Resultaten

4.1 Opzet van de optimalisatie

Bij de uitvoering van de optimalisatieberekeningen is eerst een aantal randvoorwaarden gekozen. De bedrijfseconomische randvoorwaarden die zijn toegepast bij de berekeningen van de netto contante waarde van de financiële kosten zijn:

- rentevoet 6%
- planningshorizon/afschrijvingsperiode 33 jaar
- recovery RO-installatie 50% (geen toevoegingen tegen scaling)

De optimalisatiedoelen zijn:

1. minimale netto contante waarde van totale kosten per kubieke meter²
2. minimaal debiet (pseudo-doel)
3. minimale 5 cm verlagingsstraal
4. maximale zoutvrachtreductie polder

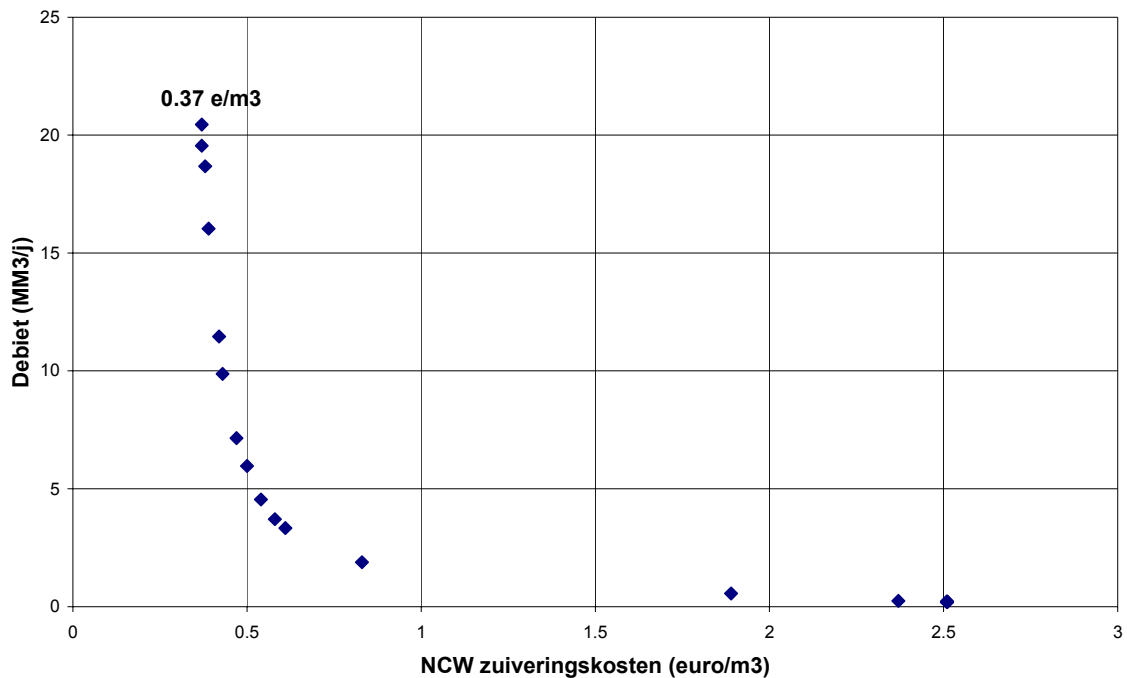
De invoering van minimaal debiet als pseudo-doel is toegepast om over een scala van verschillende debieten de optimale ontwerpkenmerken te genereren. Wanneer dit achterwege was gelaten was er slechts één optimaal debiet uitgekomen en zou daarmee de verkenning van het gehele “veld” van interessante oplossingen, met allerlei debietgrootten, niet mogelijk zijn geweest.

De berekende eigenschappen van de oplossingen bestaan uit:

- locatie van de onttrekkingsput in Amersfoortse coördinaten;
- netto contante waarde van winkosten, zuiveringskosten en additionele transportkosten;
- debiet onttrokken aan het 1^e watervoerende pakket;
- debiet onttrokken aan het 2^e watervoerende pakket;
- diameter van de 5 cm verlagingscirkel van de grondwaterstand;
- reductie van de zoutlast die via opkwellend brakwater in het oppervlaktewater van de polder komt.

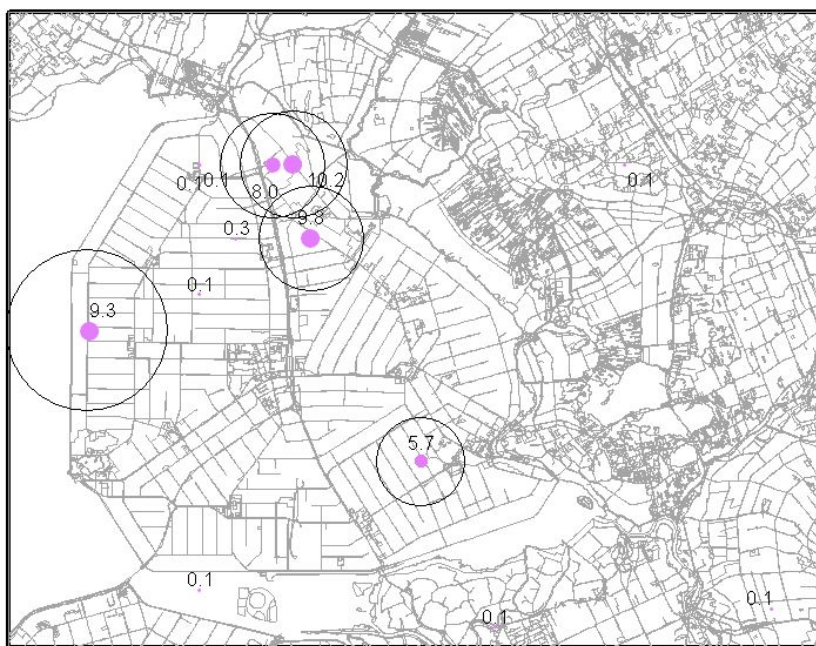
² Winkosten + zuiveringskosten + transportkosten

4.2 Resultaten



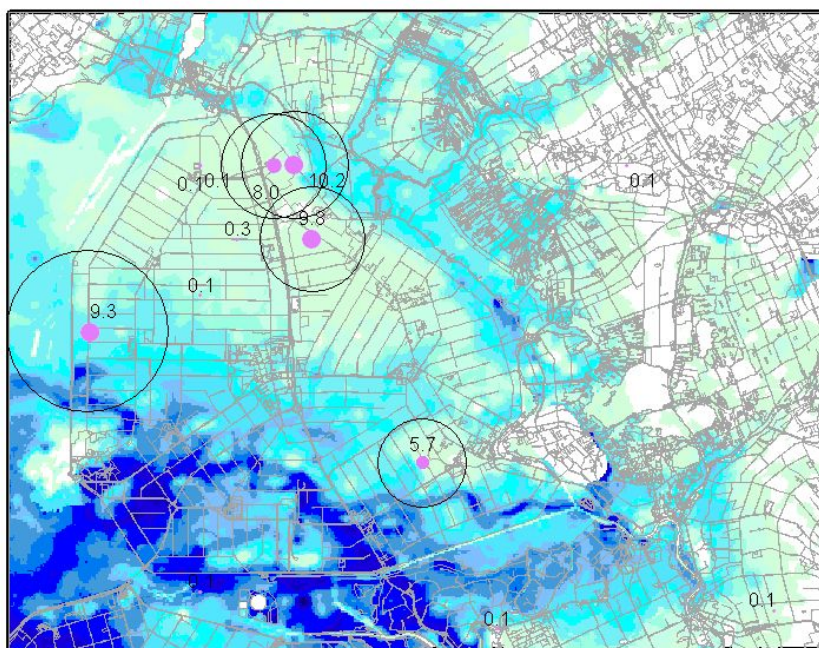
Figuur 24 Pareto front van optimale oplossingen; debiet als functie van de netto contante waarde (NCW) van de kosten

Uit Figuur 24 blijkt dat de kosten per kubieke meter geleidelijk afnemen in het traject van 0 – 20,5 Mm³/j door het schaafeffect dat in de kostenfuncties is verwerkt. Bij een ruwwaterdebiet van meer dan ca. 20,5 miljoen kubieke meter per jaar nemen de kosten niet verder af. Dit verschijnsel wordt veroorzaakt doordat de hoeveelheid brakwater in de ondergrond van de Noordoostpolder eindig is. Het brakke water is een restant van de periode toen de Afsluitdijk nog niet bestond en de Noordzee in open verbinding met de toenmalige Zuiderzee stond. Sinds de aanleg van de Afsluitdijk is een langzame verzoeting van het grondwater onder het IJsselmeer opgetreden. Wanneer gedurende tientallen jaren een substantiële hoeveelheid grondwater wordt onttrokken, dan bereikt op den duur het zoete water de onttrekkingsput. Doordat bij onttrekking van brakwater geen, en bij onttrekking van zoetwater wel grondwaterbelasting moet worden betaald zijn de productiekosten per kubieke meter hoger bij varianten waar binnen de ingestelde levensduur van de winning (33 jaar) verzoeting van het ruwwater optreedt. De optimale locatie varieert daarom met het debiet.

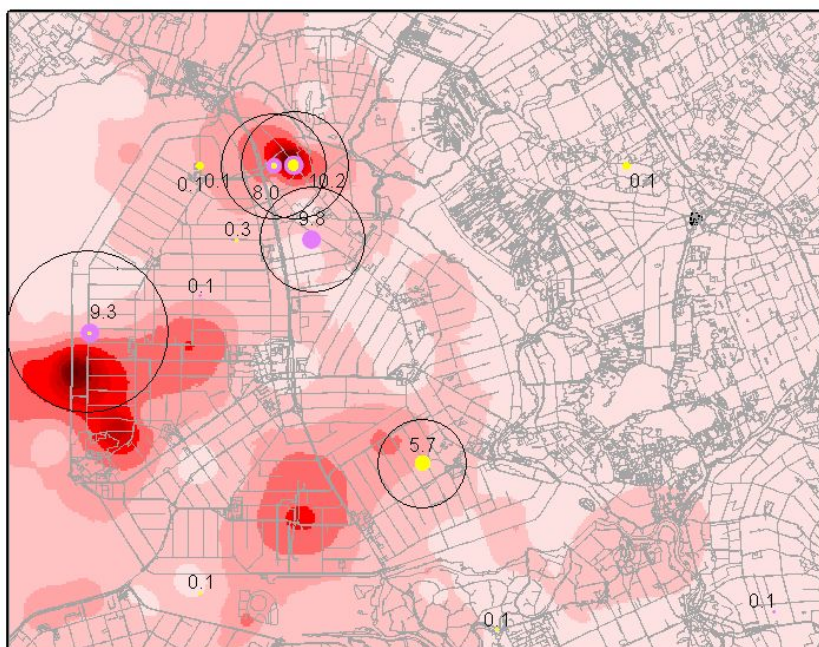


Figuur 25 Optimale locaties voor enkele reinwater debieten. De cirkels tonen de begrenzing van de 5cm verlaging van de grondwaterstand.

Vergelijking van de berekende optimale locaties met de dikte van de deklaag en de chlorideconcentraties in het eerste en tweede watervoerende pakket maakt aannemelijk dat optimale locaties voldoen aan de gespecificeerde doelstellingen. Naarmate er meer brakwater in de ondergrond aanwezig is kan langer brakwater worden onttrokken en meer zoutlastreductie worden gerealiseerd. Anderzijds vormt een “onnodig” hoge zoutconcentratie van het ruwwater een extra kostenpost voor de zuivering. Minimalisering van de grondwaterstandsverlaging door onttrekking conflicteert met maximalisering van de zoutlastreductie.



Figuur 26 Optimale locaties van enkele reinwater debieten (onttrokken uit WVP1 en 2) met als achtergrondkaart de weerstand van de deklaag.



Figuur 27 Optimale locaties van enkele reinwater debieten (onttrokken uit WVP1 en 2) met als achtergrondkaart de chlorideconcentratie in het eerste watervoerende pakket.

4.3 Chemische aspecten

De winning van brak grondwater brengt enkele chemische vraagstukken met zich mee. In deze bijdrage beperken wij ons tot de volgende kwesties:

1. Welke kwaliteiten brak grondwater zijn er voorhanden in de Noordoostpolder;
2. Hoe kunnen we brak grondwater winnen met een constant zoutgehalte?;
3. Wat gebeurt er als we 2 typen brak grondwater met elkaar mengen vóór de RO-installatie (RO = Reversed Osmosis)?
4. Wat is de kwaliteit van het permeaat (drinkwater) en concentraat (afvalwater) van een RO-installatie uitgaande van enkele typen brak grondwater uit de Noordoostpolder?
5. Wat is de verstoppingspotentie van het concentraat, eerst in de RO-installatie en daarna bij diepinfiltratie? En
6. Welke reacties treden op wanneer het concentraat de doelaquifer doorstroomt na diepinfiltratie?

Kwaliteiten brak grondwater in de Noordoostpolder

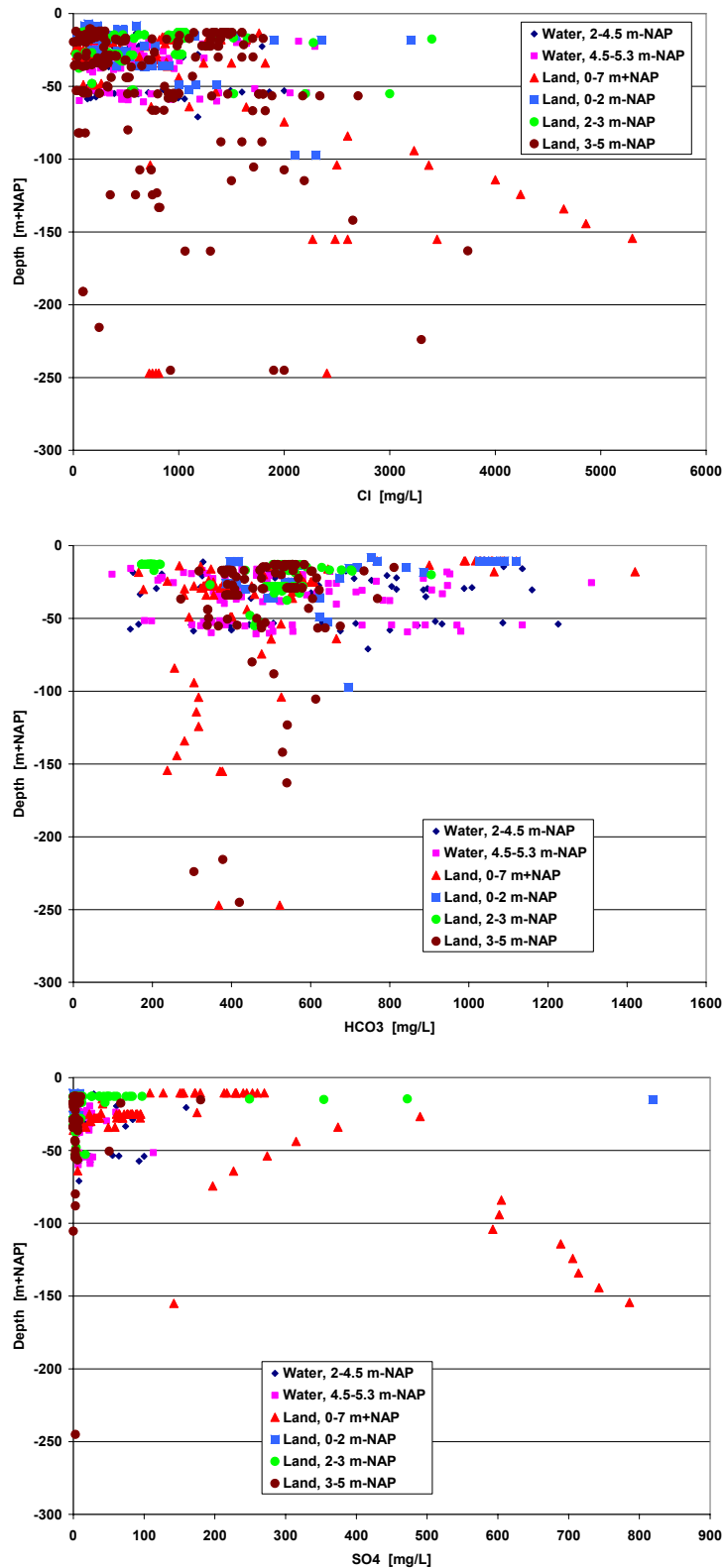
Na extractie van alle beschikbare grondwateranalyses uit TNO's database DINO is de ruimtelijke verdeling van de grondwaterkwaliteit in het in Figuur 28 aangegeven gebied geanalyseerd via een quick-scan. Deze scan baseert zich op (1) een tabellarisch overzicht met onderscheid tussen grondwater onder land en onder omringende delen van het Ysselmeer op enkele diepte-intervallen (Tabel 1), en (2) enkele grafieken waarin de concentraties van enkele ionen zijn uitgezet tegen de diepte: Cl, HCO₃ en SO₄ in Figuur 29, en NH₄, PO₄ en Fe in Figuur 30.

Tabel 1 Gemiddelde grondwaterkwaliteit onder het Ysselmeer en de Noordoostpolder als functie van de diepte. Alle gegevens uit periode 1915-2003.

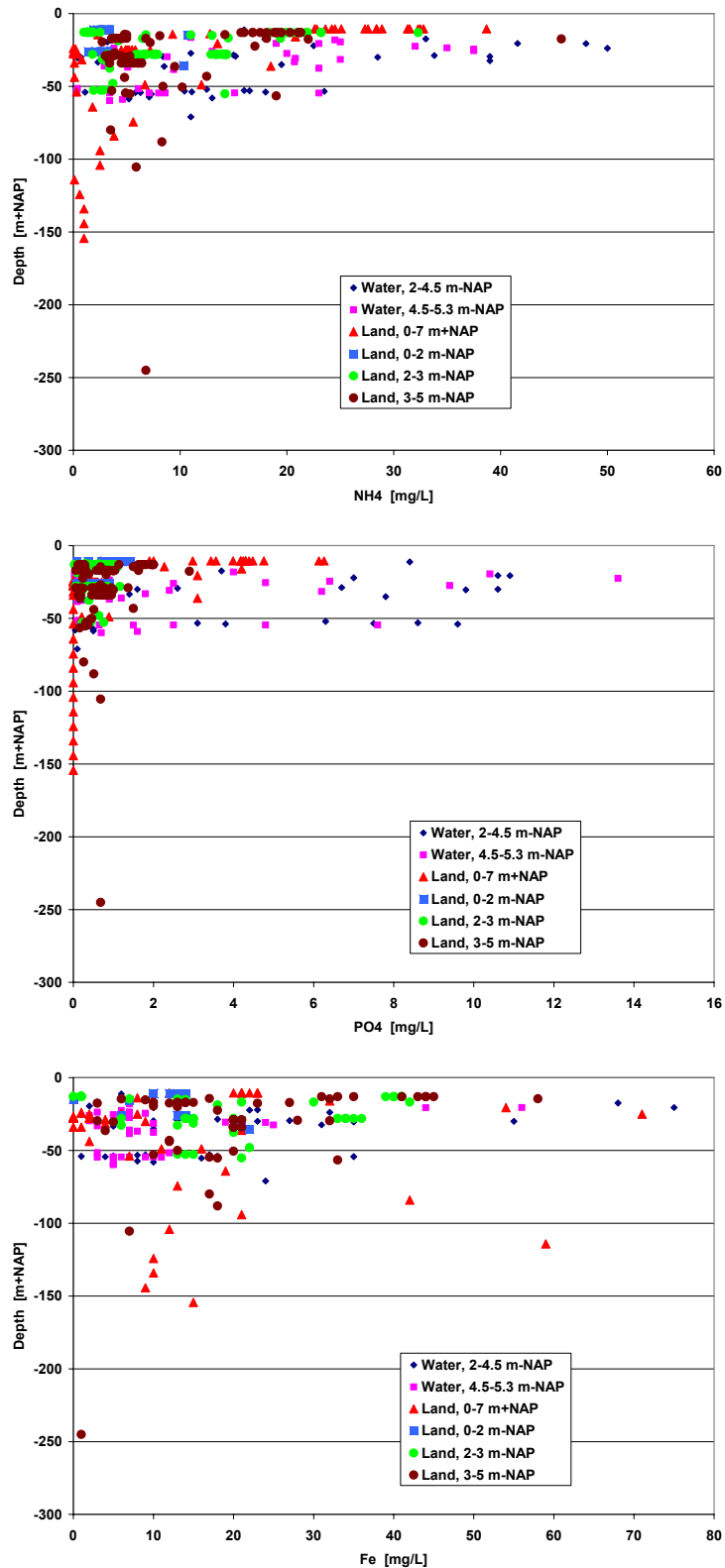
Diepte	m-NAP	Water		Land			
		0-40	40-80	0-40	40-80	80-160	160-250
Aantal	n	94	50	529	68	36	15
Filter OK	m+NAP	-26.5	-55.0	-21.2	-54.6	-115.2	-218.8
EC	mS/m	235	339	212	329	967	695
pH-lab		7.1	7.2	7.0	7.1	7.3	
Cl	mg/L	596	770	539	915	2042	1341
HCO3	mg/L	562	570	511	473	403	422
SO4	mg/L	22	26	38	54	508	70
NO3	mg/L	0.2	1.6	1.4	1.8	0.0	0.0
PO4	mg/L	3.49	2.25	0.90	0.38	0.12	0.68
Na	mg/L	276	543	262	422	1103	1030
K	mg/L	11.7	10.7	16.0	4.0	25.0	28.0
Ca	mg/L	155	143	184	189	266	67
Mg	mg/L	64	73	26	43	183	55
NH4	mg/L	20.0	9.4	8.9	6.2	2.7	6.8
Fe	mg/L	18.6	9.9	16.9	15.3	20.3	
Mn	mg/L	1.70	0.71	0.88	1.72	1.32	
SiO2	mg/L	28.2	22.8	18.9	29.7	39.3	
TOC	mg/L			16.9	7.6	8.4	4.2
KMnO4	mg/L	58	60	50	37	32	
Kleur	mg/L	32	48	38	29	23	
NH4-org	mg/L	0.49	0.72	0.29	0.27	0.25	
Al	mg/L			9			
As	mg/L			1.2			
Ba	mg/L			303			
Cd	mg/L			-0.1			
Cr	mg/L			-0.2			
Cu	mg/L			1.3			
Ni	mg/L			2.2			
Pb	mg/L			0.6			
Sr	mg/L			670			
Zn	mg/L			4			

Uit het gepresenteerde kan navolgende geconcludeerd worden:

- Zoet grondwater komt slechts zeer beperkt voor, het meeste grondwater is brak (licht tot sterk; zie par.2.3).
- Ondanks inversies zien we een gemiddelde toename van de zoutconcentratie met de diepte: 0-40 m = 550, 40-80 m = 850, 80-160 m = 2000, 160-250 m = 1350-5000 mg Cl/L;
- De bovenste 40 m van het grondwater vertoont de hoogste concentraties aan anoxische componenten (NH4, PO4, Fe, Mn) en HCO3, vooral onder het Ysselmeer;



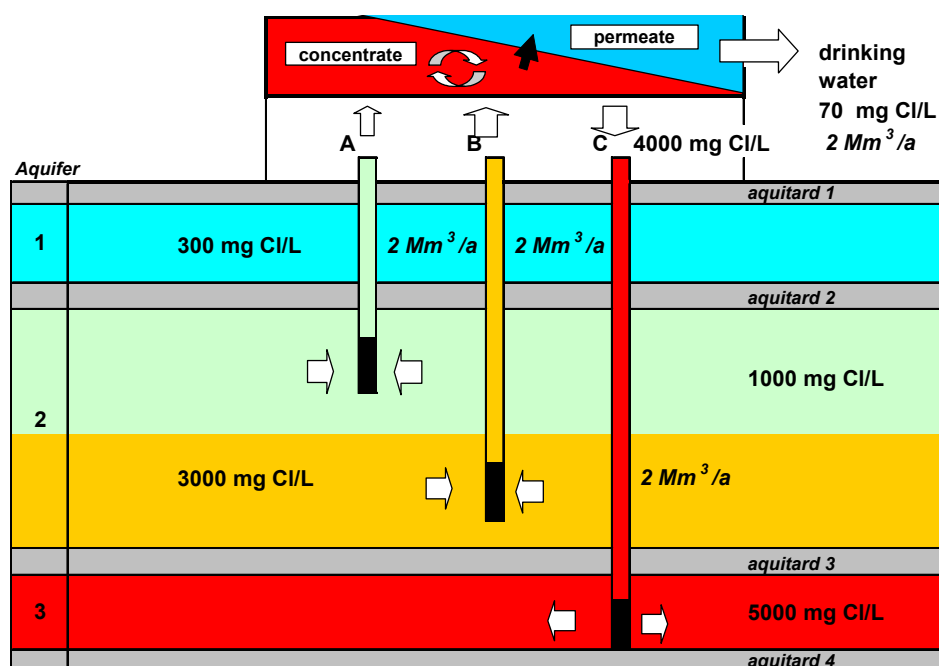
Figuur 29 Plots van chloride, bicarbonaat en sulfaat tegen de diepte in de Noordoostpolder (land) en omringende Ysselmeer (water) in de periode 1915-2003. Verder onderscheid meetpunten op basis van positie maaiveld cq onderwaterbodem.



Figuur 30 Plots van ammonium, fosfaat en ijzer tegen de diepte in de Noordoostpolder (land) en omringende Ysselmeer (water) in de periode 1915-2003. Verder onderscheid meetpunten op basis van positie maaiveld cq onderwaterbodem.

Winning brak grondwater met constant zoutgehalte

Wanneer brak grondwater gewonnen wordt in een gebied met duidelijke verticale (en horizontale) zonering in zoutconcentratie, zoals in de Noordoostpolder, dan is de kans groot dat de zoutconcentratie in de loop der tijd zal veranderen. Wisselingen in pompdebiet verhogen deze kans. Het is wenselijk de veranderingen in zoutconcentratie zo veel mogelijk te beperken, omdat zij een constante bedrijfsvoering van een RO-installatie tegenwerken. Dit kan met het in Figuur 31 geschetste concept, waarbij de afpompings van b.v. 2 winputten met verschillende en veranderende Cl-concentratie zodanig gestuurd wordt via on-line meting van het elektrisch geleidingsvermogen, dat een mengwater verkregen wordt met constant zoutgehalte.

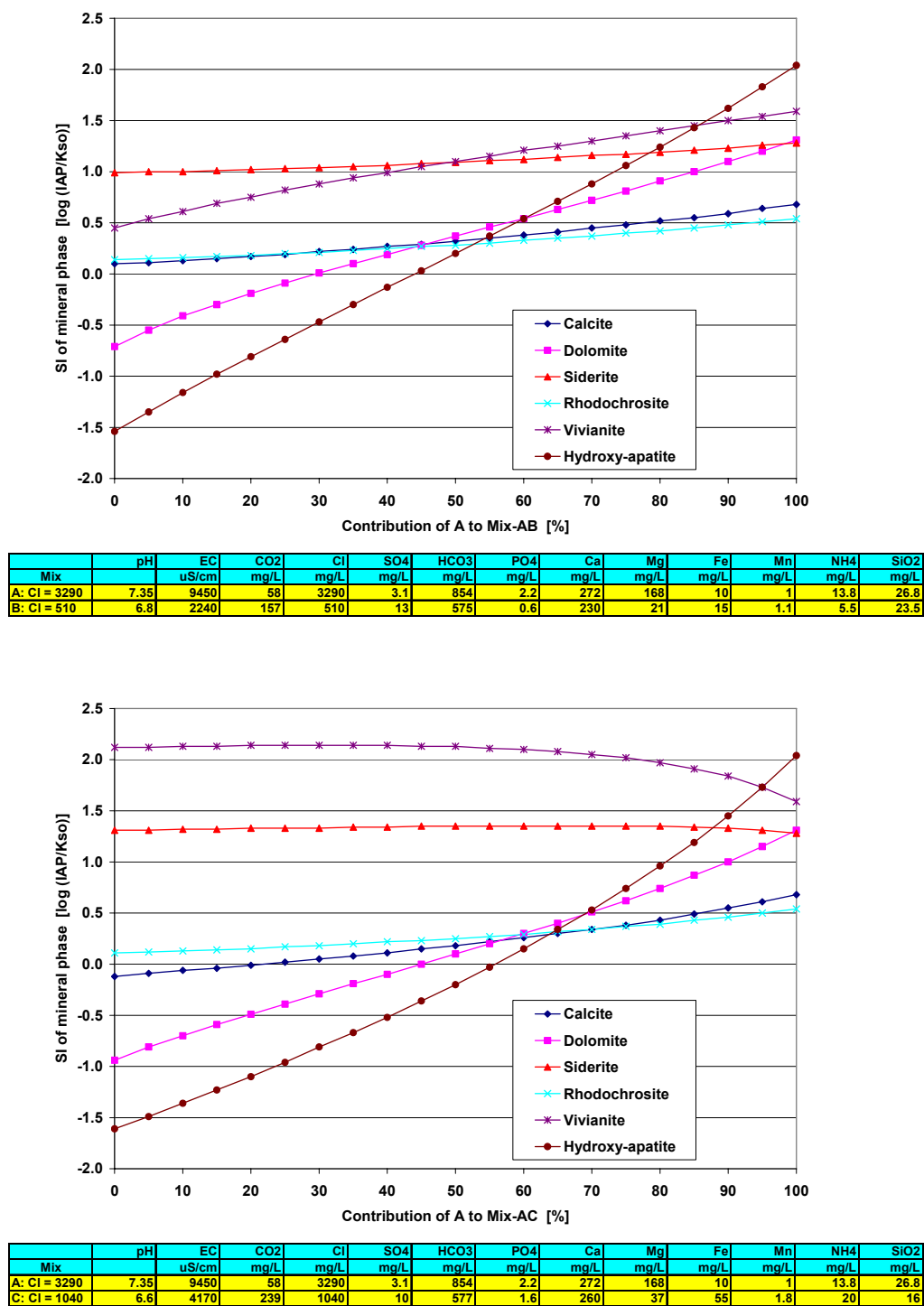


Figuur 31 Flexibel mengen van grondwater met een verschillende zoutconcentratie voor een constante samenstelling van het ruwwater, wat zuiveringstechnisch gunstig is.

Menging van 2 typen brak grondwater

Wanneer brak grondwater gewonnen wordt, eventueel met meerdere pompputten met duidelijke verschillen in zoutconcentratie, dan bestaat de kans dat hun menging in de pompput, ruwwaterleiding of voeding van de RO-installatie al aanleiding geeft tot de vorming van chemische neerslagen. Dit is nagegaan door 2 duidelijk verschillende brakwaterkwaliteiten uit de Noordoostpolder te mengen in verschillende verhoudingen en van het mengsel de samenstelling en verzadigingsindex (SI) ten opzichte van relevante mineralen te berekenen met computercode PHREEQC-2 ontwikkeld door Parkhurst & Appelo (1999). De chemische samenstelling van de mengende eindleden en de resulterende verzadigingsindices ten opzichte van 4 carbonaat- en 2 fosfaatmineralen staan

in Figuur 32. Hieruit kan worden afgeleid dat de menging op zich niet leidt tot hogere SI's dan in de mengende eindleden, en dat oververzadiging in brak grondwater een normale zaak is. Laatstgenoemde houdt in dat de berekende niveaus van oververzadiging waarschijnlijk niet zullen leiden tot neerslagvorming van deze mineralen omdat er in het water organische complexvormers zitten waar PHREEQC-2 geen rekening mee houdt, en de reactiekinetiek onvoldoende groot is b.v. door de aanwezigheid van inhibitoren als Mg en PO₄.



Figuur 32 Berekende verzadigingsindices (SI) van een mengsel A+B (boven) en A+C (onder), ten opzichte van 4 carbonaatmineralen en 2 fosfaatmineralen.

Voor samenstelling van genoemde mineralen en andere verzadigingsindices voor de mengende eindleden (A en C) zie Tabel 2.

Kwaliteit permeaat en concentraat van een RO-installatie

Voor 2 brakke grondwatertypen uit de Noordoostpolder (A en C) is de ruwwaterkwaliteit weergegeven in Tabel 1. De concentratie boor is daarin berekend onder aanname van conservatieve menging van Rijn- met oceaanwater ($B = 0.00023 \text{ Cl; mg/L}$). Voor watersoorten A en C is vervolgens berekend wat de samenstelling is van het permeaat en concentraat bij zowel 50 als 80% opbrengst ($= 100 * \text{hoeveelheid permeaat} / \text{hoeveelheid membraanvoeding}$). Deze samenstellingen zijn berekend met programmatuur van de membraanfabricanten (XL voor A, NF voor C). De resulterende mineraalverzadigingsindices zijn berekend met PHREEQC-2.

Uit Tabel 2 concluderen wij het volgende:

- De kwaliteit van het permeaat is uitstekend maar voldoet niet zonder meer aan alle drinkwaternormen. De pH en HCO_3 zijn te laag, NH_4 , Fe en Mn te hoog en boor (indien schatting juist) ook te hoog. Dit vergt nazuivering, waarbij alleen B voor technische problemen kan zorgen (indien inschatting juist). Vanzelfsprekend zijn er geen mineraalafzettingen te verwachten;
- De samenstelling van het 50% concentraat van type C wijkt af van ruwwater type A, vooral op de volgende punten: een lagere pH en duidelijk hogere concentraties Ca, NH_4 , Fe, Mn en Ba.
- De samenstelling van het 80% concentraat type A en het 50 en 80% concentraat type C vertoont een duidelijk meer gemineraliseerd karakter dan 50% concentraat type C, en kan daardoor problematisch zijn.

Verder kan worden gesteld dat het ruwe water, permeaat en concentraat naar alle waarschijnlijkheid vrij is van pathogene micro-organismen en organische microverontreinigingen.

Tabel 2 Chemische samenstelling en mineraalevenwichten (SI's) van watersoort A (Cl = 3290 mg/L) en C (Cl = 1040 mg/L) als voeding van een RO-installatie, en na RO als permeaat en concentraat bij 50 en 80% opbrengst. Getallen in reversed video vormen mogelijk een probleem iom drinkwaternormen of mineraalafzetting.

C						A					
Parameter		Shallow brackish groundwater, Cl = 1040 mg/L				Deeper brackish groundwater, Cl = 3290 mg/L					
		Raw	Concentrate		Permeate		Raw	Concentrate		Permeate	
			50%	80%	50%	80%		50%	80%	50%	80%
pH		6.6	6.84	7.13	5.04	5.2	7.35	7.52	7.36	5.67	5.52
Cl	mg/L	1040	2038	4949	42	62	3290	6657	16359	69	114
HCO3	mg/L	577	1142	2803	11	17	854	1680	3797	11	17
SO4	mg/L	10	19.9	49.6	0.1	0.1	3.1	6.2	15	0	0.7
PO4	mg/L	1.6	3.19	7.93	0.01	0.02	2.2	4.39	11	0.01	0.48
Na	mg/L	480	965	2335	23	34	1820	3601	8840	40	65
K	mg/L	15	29.3	70.7	0.7	1.1	65.8	130.1	319.3	1.5	2.4
Ca	mg/L	260	515	1271	5	7	272	541	1338	3	6
Mg	mg/L	37	73	181	1	1	168	334	826	2	4
NH4	mg/L	20	38.9	93.8	1.1	1.6	13.8	27.3	66.8	0.3	0.5
Fe	mg/L	55	109.6	272.7	0.4	0.6	10	19.9	48	0.1	2.2
Mn	mg/L	1.8	3.59	8.93	0.01	0.02	1	1.99	4.5	0.01	0.22
SiO2	mg/L	16	31.6	77.6	0.4	0.6	26.8	53.3	132.2	0.3	0.5
B	ug/L	239	239	239	239	239	757	757	757	757	757
Ba	ug/L	600	1190	2930	10	20	300	600	1480	10	10
F	ug/L	100	196	476	4	6	50	101	249	1	2
Sr	ug/L	1510	2990	7360	30	50	2290	4590	11320	80	80
Mineral Saturation index SI											
SI - Calcite		-0.12	0.59	1.48	< 0.0		0.68	1.31	1.67	<0.0	
SI - Aragonite		-0.27	0.44	1.32			0.53	1.15	1.52		
SI - Dolomite		-0.94	0.48	2.26			1.3	2.56	3.33		
SI - Siderite		1.31	1.95	2.72			1.28	1.8	2.38		
SI - Rhodochrosite		0.11	0.74	1.5			0.54	1.06	1.59		
SI - Strontianite		-1.82	-1.11	-0.23			-0.86	-0.23	0.13		
SI - Barite		0.09	0.47	0.94			-0.98	-0.63	0.03		
SI - Hydroxyapatite		-1.61	1.31	4.75			2.03	4.26	5.94		
SI - SiO2 am		-0.74	-0.43	-0.02			-0.5	-0.19	0.26		
SI - Al(OH)3 am		-1.14	-0.84	-0.61			-1.46	-1.34	0.46		
SI - Vivianite		2.12	3.64	5.31			1.59	2.58	7.28		
SI - Alunite		-0.75	0.04	0.64			-4.66	-4.21	2.84		
SI - Gypsum		-2.37	-1.99	-1.51			-3.11	-2.75	-2.05		

Evenwicht als SI = 0; Oververzadiging als SI > 0; Onderverzadiging als SI < 0.

Verstopingspotentie van concentraat

Met de in Tabel 2 gegeven mineraalverzadigingsindices zijn enkele voorzichtige uitspraken te doen over de kans van chemische neerslagvorming en daardoor verstopping van eerst de RO-installatie en/of vervolgens de injectieput die het concentraat in een diepe aquifer loost. Aanname hierbij is dat het ruwe voedingswater anoxisch gehouden wordt, zodat er geen oxidatiereacties optreden.

Voor zowel type A als C lijkt 80% opbrengst te leiden tot dusdanige oververzadigingen dat de verstopingspotentie van het concentraat te hoog wordt (en daardoor ook het risico op chemische verstopping).

Met rekenschap van alle complicaties in de beoordeling van SI's (zie bv Stuyfzand et al., in prep) lijken vooral calciet en sideriet kandidaat voor neerslagvorming. Daarnaast valt de neerslag van fosfaten niet uit te sluiten, en kan op specifieke lokaties ook barietneerslag optreden.

In hoeverre microbiologische verstopping op kan treden, is onbekend. Nader onderzoek is op dit punt gewenst bv door bepaling van het AOC-getal.

Verstopping van de injectieput door gasbellen kan worden tegengegaan door het systeem onder druk te houden. Anders valt te vrezen voor de vorming van gasbellen bestaande uit vooral methaan en koolzuurgas.

Bodemreacties na diepinfiltratie

De menging van het injectaat met gebiedseigen brak tot zout grondwater leidt normaliter niet tot serieuze verstoppingsverschijnselen, omdat het hierbij betrokken watervolume te gering is.

Wanneer wordt afgezien van het gebruik van zuren en/of antiscalants, zullen minerale fasen niet of nauwelijks oplossen, omdat de oplossing al oververzadigd is vóór infiltratie. Ook redox reacties zullen nauwelijks optreden, daar het geïnjecteerde water en de doelaquifer (diep) anoxisch zijn. De bodemreacties zullen derhalve beperkt zijn tot kationuitwisseling en de afzetting van enkele mineralen zoals calciëet en sideriet, en misschien ook dolomiet, apatiet, vivianiet, bariet en opaal (amorf silica).

Conclusies chemische aspecten

Op basis van de beschikbare gegevens lijkt het beter brak grondwater beneden 50 m-NAP te gebruiken in verband met lagere concentraties aan storende, anoxische bestanddelen zoals PO₄, NH₄, Fe en Mn. Daarbij is het nuttig op 2 dieptes met verschillende zoutconcentratie (bv op 60-80 en 120-140 m-NAP) te winnen zodat via on-line EC-monitoring gestuurd kan worden op een gemengd ruwwater met een constante zoutconcentratie. Door de RO-opbrengst bescheiden te houden (ca 50%) en het water overal anoxisch, wordt de verstoppingspotentie van het concentraat voor zowel de RO-installatie als de injectieput op aanvaardbaar niveau gehouden. Hoewel het concentraat dan oververzadigd is ten opzichte van diverse mineralen, lijkt neerslagvorming toch onwaarschijnlijk als gevolg van ervaringen elders opgedaan, niet verdisconteerde organische complexvormers in de berekeningen, en inhibitie van kristallisatie (door o.a. DOC, fosfaat en Mg). Het permeaat vormt een goede bron van drinkwater, en vergt op zijn minst nabehandeling middels beluchting en snelfiltratie. Relatief hoge boor concentraties in brak grondwater (hypothese die middels analyses bevestigd dient te worden) en een geringe retentie bij omgekeerde osmose kunnen echter zorgen voor problemen in verband met overschrijding van de drinkwaternorm van 500 µg/L.

Diverse onzekerheden nopen tot nader onderzoek. Het betreft onzekerheden in de huidige ruimtelijke verdeling van de grondwaterkwaliteit en de concentraties van kritische stoffen als B, As en CH₄ in het brakke grondwater in de Noordoostpolder.

Vervolgens zijn er onzekerheden in de zegkracht van berekende mineraalevenwichten. Oververzadiging hoeft niet te betekenen dat er mineralen neerslaan. Bij welk niveau van oververzadiging dit wel gebeurt, in afhankelijkheid van de algehele chemische samenstelling, is een belangrijke vraag vanwege verstoppingsgevaar van membranen en injectieputten. Dit dient met een pilot plant te worden onderzocht.

4.4 Algemene conclusies en aanbevelingen

Het primaire doel van deze studie betreft onderzoek naar mogelijkheden om GIS-georiënteerde beslissingondersteunende systemen te bouwen en vervolgens toe te passen om alternatieve scenario's van drinkwaterproductie te verkennen. Bij uitvoering van deze studie is gebleken dat modulaire koppeling van de optimalisatiemodule en de effectmodellen met de ArcGis Modelbuilderomgeving een efficiënte techniek is waarmee in korte tijd de technische haalbaarheid van brakwaterwinning in de Noordoostpolder kon worden verkend. Dankzij de geformaliseerde opzet is snel gebleken welke factoren vooral bepalend zijn voor een kosteneffectieve winning van brakwater.

Vergunningtechnische aspecten van een eventuele brakwaterwinning, en met name de injectie van brijn in de ondergrond, vormen een zeer belangrijke factor die in deze verkenning buiten beschouwing zijn gelaten. De afweging van de voor- en nadelen van de brakwaterwinning in juridisch en bestuurlijk kader is complex en niet echt opportuun gezien de verkennende aard van deze studie en het primair technische doel. Het is interessant dat een onttrekking te combineren valt met verbetering van de kwaliteit van het oppervlaktewater in de Noordoostpolder, terwijl kunstmatige infiltratie van brijn in diepgelegen aquifers zonder ecologische schade gerealiseerd kan worden. Zowel landbouw als aquatische flora en fauna zouden daar vruchten van plukken. De eindigheid van de brakwaterbron onder de Noordoostpolder is een gevolg van menselijk ingrijpen in de vorm van de aanleg van de Afsluitdijk en de inpoldering van gebieden die ooit tot de Zuiderzee behoorden. In KRW (Kaderrichtlijn Water) perspectief lijkt het zwaartepunt van de afweging te liggen bij de te verwachten verbetering van de oppervlaktewaterkwaliteit in zowel de polder zelf als het IJsselmeer.

Uit de berekeningen blijkt dat de door de onttrekking versnelde verzoeting van de ondergrond bij grotere debieten sturend is voor de kosten. Zonder verdiscontering van kosten om brijn in diepe aquifers te pompen ligt het optimum bij 10 Mm³/j reinwater (=20 Mm³/j ruwwater bij 50% recovery). Een hoger debiet leidt tot hogere kosten per kubieke meter, primair als gevolg van de gehanteerde grens voor verschuldigde grondwaterbelasting bij 300 mg/l chloride (Wet Belastingen op Milieugrondslag 1994, art. 3b).

5 Literatuur

1. Appelo, C.A.J. & D. Postma 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, 536p.
2. Bernhardt, L. "Lozingsmogelijkheden voor brijn", 2004, Kiwa Water Research BTO 2004.074
3. Beasley D., D. R. Bull and R. R. Martin (1993), An overview of genetic algorithms, University Computing.
4. Burrough, P.A. "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment", 1986 Clarendon Press Oxford.
5. Gedeputeerde Staten Flevoland, 2005. "Hoofdlijnennota Omgevingsplan Flevoland 2006, 2005, Gedeputeerde Staten Flevoland. nr. CS/05.030577/A
6. Gijsbertsen A. J. , Bernhardt L., Kappelhof J. , Kooiman J. W., "Beleidsmatige, bestuurlijke en juridische aspecten bij brakwaterwinning en concentraatlozing", 2005, Kiwa Water Research BTO 2005.005
7. Glasbergen P. et al. "Naar een Strategisch Grondwaterbeheer", 1989, VUGA Den Haag
8. Groffman P.M. et al. "Integrated Regional Models, Interactions between humans and their environment". 1994 Chapman & Hall London.
9. Hemker, C.J. en C. Maas, 1987: Unsteady flow to wells in layered and fissured aquifer systems, Journal of Hydrology, 90 (1987) 231-249.
10. Maas, Kees en Theo Olsthoorn, 1997: Snelle oudjes gaan Matlab, Stromingen 3 (1997) No. 4
11. Omgevingsplan Flevoland, 2000, nr. ROV/00.091163-/ A
12. Parkhurst, D. L. and C.A.J. Appelo. 1999. User's guide to Phreeqc (version 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources Investigations Report 99-4259. USGS, Denver, Co.
13. Ramaker, A.B. , M. Blokker, R. Beuken, G.A. van den Berg, G. Cirkel, E. Cornelissen, A. Doomen, J. Kappelhof, B. Raterman, P. Stuyfzand, K. Vink. 2006. "Flexwater, inventarisatie van bronnen, berging, zuivering en infrastructuur", Kiwa Water Research BTO 2006.036
14. Schaffers, H. "Computerondersteuning en Planning, Mogelijkheden en beperkingen bij regionale watervoorziening". 1984 proefschrift TH Twente.
15. Stuyfzand P.J., J.W. Kooiman, A. Oosterhof & K.J. Raat, in prep. Problems and solutions when recharging brackish aquifers with membrane concentrate from a less brackish groundwater source. Proc. ISMAR-6, October 2007, Phoenix, Arizona.
16. Vink, C. and P.P. Schot., 2000." Application of a genetic algorithm in a GIS-based decision support system for multi-objective optimisation of drinking water production". Proceedings from the 4th International Conference on GIS and Environmental Modelling (GIS/EM4), Banff, Canada, September 2-8, 2000.
<http://www.colorado.edu/research/cires/banff/pubpapers/187/>

17. Vink, C; Schot, P.P. 2002. "Multiple objective optimization of drinking water production strategies using a genetic algorithm" *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 9, doi:10.1029/2000WR000034, 2002
18. Waterwatch, Waterstructuurplan Noordoostpolder, i.o.v. Waterschap Zuiderzeeland

6 Bijlagen

Projectplan Flexwater – beslissingondersteunend planninginstrument

Projectnaam Flexwater Pilots 3 ^e fase	Programmalijn Risicomanagement bronnen	Datum
Opdrachtgever College van Opdrachtgevers	Projectmanager Toine Ramaker	Startdatum project Januari 2006
Voorzitter programmalijn Theo Olsthoorn	Programmalijntrekker Arthur Meuleman	Einddatum project December 2007

Projectomschrijving

Integreer in vorige fasen van het project Flexwater verworven kennis in een beslissingondersteunend planninginstrument; pas het instrument toe op twee pilot studies en verken zo mogelijkheden voor flexibilisering van productie en transport van drinkwater zodat de drinkwatervoorziening ook in de toekomst optimaal blijft functioneren.

1. Inleiding

De Nederlandse drinkwatervoorziening is in internationaal perspectief zeer efficiënt en betrouwbaar. Niettemin bestaan er diverse ontwikkelingen die het noodzakelijk maken om de huidige inrichting van de drinkwatervoorziening tegen het licht te houden: schaalvergroting, klimaatverandering, onzekere watervraag, terrorisme, vervanging van infrastructuur, fusies, waterwinningen met kwaliteitsproblemen en technologische ontwikkelingen.

De hierboven genoemde ontwikkelingen beïnvloeden de randvoorwaarden en uitgangspunten op basis waarvan (investerings)beslissingen worden genomen en stellen waterbedrijven continu voor de uitdaging om de watervoorziening te (her) optimaliseren. Flexibilisering van de drinkwatervoorziening biedt mogelijkheden om in te spelen op de geschetste toekomstige ontwikkelingen en is een bouwsteen om de watervoorziening verder te optimaliseren.

In de eerste fase van het project Flexwater zijn winbare grondstofbronnen geïnventariseerd en zijn rekenregels ontwikkeld om de bedrijfseconomische kosten van winning, zuivering en transport te kwantificeren. In de tweede fase van het project zijn vormen van flexibele drinkwatervoorziening verkend, o.a. door het beschrijven van concepten vanuit een “groene weide” perspectief, waarbij de bestaande inrichting van de drinkwatervoorziening buiten beschouwing werd gelaten. In de derde fase van het project wordt de haalbaarheid van alternatieve flexwaterconcepten getoetst aan concrete, bestaande situaties, waarbij de opbrengsten van de vorige fasen van het project worden meegenomen in de kostenmodellen en bij scenariokeuzen. Er

wordt rekening gehouden met de specifieke boekwaarden en exploitatiekosten van bestaande productiemiddelen. De beoordeling van de kansrijkheid van flexwaterconcepten wordt daardoor complexer. Er zijn weinig *technische* beperkingen bij drinkwaterproductie en transport, zodat er veel verschillende manieren zijn om aan de drinkwatervraag te voldoen. Naast technische haalbaarheid zijn er ook andere criteria waar alternatieven op getoetst moeten worden, zoals leveringszekerheid, bedrijfseconomie, reinwaterkwaliteit, flexibiliteit, ecologie en ruimtelijke en bestuurlijke ontwikkelingen.

2. Doel

Doel van de derde fase van het project Flexwater is het efficiënt genereren en beoordelen van kansrijke nieuwe concepten voor productie en transport van drinkwater in bestaande situaties, zodat de drinkwatervoorziening kosteneffectiever wordt, minder verdroging veroorzaakt, de vergunde capaciteit beter wordt benut en beter is ingespeeld op toekomstige ontwikkelingen.

3. Aanpak

Voor de realisatie van het hierboven beschreven doel wordt een beslissingondersteunend reken/planningsinstrument ontwikkeld, bedoeld voor verkennende studies op regionale schaal, waarmee de bijdrage van flexibele oplossingen aan de optimalisering van de drinkwatervoorziening in beeld wordt gebracht. Het instrument bestaat uit een set effectmodellen en een optimalisatiemodule, gekoppeld met een GIS (geografisch informatiesysteem).

Functionaliteit

De functionaliteit van het instrument kent twee sporen, het scenariospoor en het optimalisatiespoor. Het eerste spoor heeft betrekking op het doorrekenen van één enkele *productieconfiguratie*, het tweede spoor biedt de mogelijkheid om met behulp van de optimalisatiemodule te zoeken naar interessante alternatieve productieconfiguraties. Een productieconfiguratie is de vorm waarin de drinkwatervoorziening in een gebied plaats kan vinden, bestaande uit één of meerdere vraagpunten, pompstations, zuiveringinstallaties en een transportnetwerk, waarbij van elk onderdeel de locaties en debieten zijn vastgesteld.

Bij gebruik volgens het eerste spoor, het scenariospoor, definieert een gebruiker een productieconfiguratie en berekent m.b.v. het instrument de relevante effecten. Effecten worden berekend met de modellen die door de gebruiker geselecteerd zijn. Met de modellen wordt bijvoorbeeld berekend wat de effecten zouden zijn van een klimaatscenario, samenvoeging van voorzieningsgebieden, invoering van een technologische vernieuwing, of van een stapsgewijze vervanging van transportleidingen.

Bij gebruik volgens het tweede spoor, het optimalisatiespoor, ligt de productieconfiguratie niet van tevoren al vast, maar wordt voor een deel nog open gehouden, door bijvoorbeeld in plaats van vaste locaties van productiemiddelen zoekgebieden te definiëren. De gebruiker definieert in dit geval geen productieconfiguratie, maar in plaats daarvan randvoorwaarden

waaraan alternatieve configuraties moeten voldoen. De optimalisatiemodule van het instrument genereert dan een groot aantal configuraties die voldoen aan de door de gebruiker ingestelde randvoorwaarden. Van elke configuratie worden de effecten berekend. De gebruiker kan naderhand de eigenschappen van de verschillende configuraties en de bijbehorende effecten inspecteren. De resultaten worden gevisualiseerd in de vorm van kaarten, tabellen en grafieken. Op grond van de resultaten kan een bepaalde configuratie meer in detail door de gebruiker worden geanalyseerd, of er kan een nieuwe optimalisatie worden gestart met gewijzigde randvoorwaarden.

Het voordeel voor de gebruiker bij het eerste spoor is dat bedrijfseconomische, technische en andere 'effecten' van productieconfiguraties snel inzichtelijk zijn. Bij gebruik volgens het tweede spoor kan het instrument ook worden gebruikt om interessante alternatieve configuraties te identificeren en de effecten ervan te berekenen.

Effecten van alternatieve bronnenkeuzen, zuiveringsscenario's en transportvarianten kunnen in een ruimtelijk gedifferentieerde context worden beoordeeld op leveringszekerheid, kwaliteit, kosteneffectiviteit, ecologische effecten, flexibiliteit en bestuurlijk draagvlak etc. Het instrument krijgt een modulaire structuur, zodat gemakkelijk effectmodellen kunnen worden toegevoegd of weggelaten, afhankelijk van de aard van de uit te voeren studies. Voor de criteria die de haalbaarheid van alternatieven bepalen worden indicatoren gekozen die een geschikte maatlat vormen om prestaties weer te geven. De indicatoren worden berekend met de effectmodellen. Sommige modellen moeten nog worden gemaakt, maar de meeste zijn al beschikbaar of kunnen snel worden gebouwd op basis van rekenregels die geformuleerd tijdens eerdere fasen van het Flexwaterproject. Een opsomming van modellen die in aanmerking komen om aan het instrument gekoppeld te worden staat in Tabel 3.

Tabel 3 Modellen die in aanmerking komen om met het flexwater planningsinstrument gekoppeld te worden

Nr	Onderdeel	Modelnaam	Status
1	Vraagprognoses		Bestaand model
2	Productiekosten		Rekenregels beschikbaar
3	Verdeling debieten transportleidingen	Busack	Bestaand algoritme of Aleid
4	Kosten transportleidingen		Rekenregels beschikbaar
5	Hydrologische effecten		Diverse methoden beschikbaar
6	Verdrogings/vernattingschade landbouw	Bodep	Bestaand model
7	Ecologische effecten	Niche	

8	Zuiveringskosten		Rekenregels beschikbaar
9	Ruwwaterkwaliteitsprognoses	NSH, Respond	Bestaande modellen
10	Ruwwater risico	Respond	Bestaand model
11	Leveringszekerheid		Niet bestaand
12	Flexibiliteit		Niet bestaand
13	Optimalisatiemodule	GA_ET	Bestaande module

Ontwikkeling

De ontwikkeling van het instrument is opgedeeld in drie stappen.

1^e stap van het project: ontwikkeling prototype en eerste performancetest

In de eerste stap wordt de bouw van het instrument gestart. De eerste pilot studie wordt tegelijk met de bouw van het instrument uitgevoerd. Bij het begin van de eerste pilot studie wordt een projectgroep ingesteld met medewerkers van het waterbedrijf in wiens voorzieningsgebied de studie wordt uitgevoerd. Met de projectgroep wordt overlegd over doelen en uitwerking van de pilot studie en over het functionele ontwerp van het instrument. Er zullen regelmatig vergaderingen met de projectgroep worden belegd om de resultaten terug te koppelen. De probleemstelling in de pilot studies bepaalt welke modellen nodig zijn voor de berekening van de flexwatervarianten.

Het functionele ontwerp is de basis voor het technische ontwerp van het instrument. Wanneer zowel functioneel als technisch ontwerp zijn afgerond worden de geselecteerde modellen in het raamwerk van het instrument geplaatst.

Het eerste prototype van het instrument, nog zonder gebruikersschil, wordt gebruikt om verkennende berekeningen uit te voeren. De resultaten van deze berekeningen en de daarvoor benodigde rektijden wijzen uit of de gekozen opzet rekentechnisch geschikt is om de doelen te bereiken.

Opbrengsten 1^e stap:

- Een eerste prototype van het instrument, zonder gebruikersschil.

2^e stap van het project: uitwerking eerste pilot studie en verdere ontwikkeling instrument

De 2^e stap van het project begint met het organiseren van de gegevens van de eerste pilot studie en met verdere afstemming van het instrument op de doelen. De gebruikersschil wordt ontwikkeld en er worden verkennende berekeningen uitgevoerd om de gevoeligheid van het systeem van de pilot studie te verkennen.

Op grond van de eerste resultaten worden scenario's gedefinieerd. Optimale productie-transportconfiguraties worden berekend bij verschillende aannamen t.a.v. bronnenkeuze, kosten van decentrale drinkwatervoorziening in buitenposten en kosten van instandhouden/vernieuwen van hoofdtransportleidingen.

Wanneer voldoende inzicht is verkregen in de gevoeligheden van het systeem kunnen "tweede orde" berekeningen en optimalisaties worden uitgevoerd.

Hier worden voor de criteria *flexibiliteit* en *leveringszekerheid* geschikte indicatoren ontwikkeld.

Flexibiliteit heeft betrekking op de mate waarin snel en gemakkelijk veranderd kan worden van productieconfiguratie, met de nadruk op bronkeuze. Leveringszekerheid heeft betrekking op de risico's van uitval van één of meerdere pompstations, zuiveringen of transportleidingen.

Flexibiliteit bepaalt slechts een deel van de leveringszekerheid. Wanneer veel alternatieve winmiddelen of transportmiddelen beschikbaar zijn, maar ze zijn allemaal kwetsbaar, dan kan de flexibiliteit hoog zijn, maar de leveringszekerheid toch relatief laag. De beschikbaarheid van meer pompstations en brontypen dan o.g.v. de vraag nodig is biedt hoge flexibiliteit, maar de leveringszekerheid kan toch relatief laag zijn wanneer er maar één transportleiding is om het water te transporteren.

Opbrengsten 2^e stap:

- Rapportage eerste pilot studie
- Rapportage van het instrument en de daarin opgenomen modellen

3^e stap van het project: rapportage, documentatie en disseminatie

Tijdens de 3^e stap van het project wordt een tweede pilot studie uitgevoerd en wordt de functionaliteit van het instrument naar behoefte verder ontwikkeld. Net als tijdens de tweede stap wordt een projectgroep gevormd voor de pilot studie. De ontwikkeling van het instrument wordt afgerond tijdens de 3^e stap.

Opbrengsten 3^e stap:

- Rapportage tweede pilot studie
- Instrument met gebruikersschil
- Gebruikershandleiding voor het instrument
- Workshop met presentatie van de resultaten van de twee pilot studies en uitvoering van een flexwater planningspel waar de deelnemers aan de workshop bij worden betrokken.

7 Presentaties

(CD Rom)