

**Deltares-rapport**

**2008-U-R1084/A**

**Grondwatereffecten aan de oppervlakte (gebracht)**

*Onderzoek naar effecten van stopzetting*

*grondwateronttrekking DSM Delft - Technisch rapport*

**Bodem- en  
Grondwatersystemen**  
Princetonlaan 6  
Postbus 85467  
3508 AL Utrecht

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)

T 030 256 47 50

F 030 256 48 55

[info@deltares.nl](mailto:info@deltares.nl)

Datum november 2008

Auteur(s) Frans Roelofsen  
Neeltje Goorden

Mede-auteurs:

Jelle Buma, Serge van Gessel, Bart Goes,  
Ger de Lange, Hans van Meerten, Niels van Oostrom,  
Gu Oude Essink, Frederiek Sperna Weiland, Hans Veldkamp,  
Toine Vergroesen, Jarno Verkaik en Hans Gehrels

Onderzoekspartners Provincie Zuid Holland  
Hoogheemraadschap van Delfland  
Gemeente Delft  
Delft Cluster

Projectnummer 092.35161

Aantal pagina's 196 (incl. bijlagen)  
Aantal bijlagen 1

Goedgekeurd door Hans Gehrels

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Deltares.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan Deltares, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het Deltares-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.



## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>7</b>
1.1	Achtergrond .....	7
1.2	Gerelateerde rapportages .....	7
1.3	Leeswijzer Technisch Rapport.....	8
<b>Deel I –Geo(hydro)logie van de ondergrond.....</b>		<b>9</b>
<b>1</b>	<b>Regionaal geo(hydro)logisch model van de deklaag</b> .....	<b>11</b>
1.1	Achtergrond .....	11
1.2	Processchema.....	12
1.3	Toelichting modelbouw .....	12
1.4	Resultaten .....	17
<b>2</b>	<b>Geo(hydro)logisch detailmodel van de deklaag</b> .....	<b>19</b>
2.1	Achtergrond .....	19
2.2	Uitwerking .....	19
2.3	Griddefinitie.....	19
2.4	Brongegevens .....	19
2.5	Onderkant model.....	26
2.6	Interpolatie lithologie.....	26
<b>3</b>	<b>Geo(hydro)logisch ondergrondmodel – pleistoceen</b> .....	<b>29</b>
3.1	Achtergrond .....	29
3.2	Bronbestanden .....	29
3.3	Algemene opzet ondergrondmodel .....	29
3.4	Uitwerking ondergrondmodel.....	30
3.5	Laagindeling en parameterisatie Holocene deklaag.....	31
3.6	Laagindeling en parameterisatie Pleistoceen .....	33
3.7	Resultaten .....	36
<b>4</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>40</b>
<b>Deel II – Kwantiteitsmodel Grondwater</b> .....		<b>41</b>
<b>1</b>	<b>Kwantiteitsmodel Grondwater – algemeen</b> .....	<b>43</b>
1.1	Inleiding .....	43
1.2	Toelichting op nieuwe modelschil iMOD.....	43
1.3	Gebruiksmogelijkheden modelschil iMOD .....	45
<b>2</b>	<b>Modelranden en randvoorwaarden</b> .....	<b>47</b>
<b>3</b>	<b>Onttrekkingen</b> .....	<b>49</b>
3.1	Inleiding .....	49
3.2	Verwerking onttrekkingen in grondwater model .....	49
3.3	Winning DSM terrein .....	50
<b>4</b>	<b>Oppervlaktewatersysteem</b> .....	<b>53</b>
4.1	Implementatie oppervlaktewater.....	53

4.2	Modelparameters m.b.t. oppervlaktewater.....	55
<b>5</b>	<b>Drainage.....</b>	<b>61</b>
5.1	Inleiding .....	61
5.2	Drainage in het landelijke gebied .....	61
5.3	Stedelijke drainage.....	63
5.4	Conceptverbetering .....	64
5.5	Drainage bij bijzondere constructies.....	65
<b>6</b>	<b>Grondwateraanvulling .....</b>	<b>67</b>
6.1	Concept grondwateraanvulling .....	67
6.2	Resultaat grondwateraanvulling berekend met Capsim.....	71
6.3	Grondwateraanvulling gewijzigd.....	73
<b>7</b>	<b>AHN filtering.....</b>	<b>75</b>
7.1	Inleiding .....	75
7.2	Gebruikte bronbestanden: AHN4 en Regis2.....	75
7.3	AHN-Filter.....	76
7.4	Corrigeren van stedelijk maaiveld .....	77
<b>8</b>	<b>Ijking.....</b>	<b>79</b>
8.1	Achtergrond .....	79
8.2	Modelanalyse .....	79
8.3	IJking .....	79
8.4	Resultaten van de stationaire ijking .....	82
8.5	De Representermethode.....	89
8.6	Niet stationaire ijking.....	90
<b>9</b>	<b>Nauwkeurigheid van het model .....</b>	<b>97</b>
9.1	Ruimtelijke onzekerheden .....	97
9.2	Temporele onzekerheden.....	98
9.3	Nauwkeurigheid van berekende effecten.....	99
9.4	Conclusie .....	99
<b>10</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>100</b>
<b>Deel III – Kwaliteitsmodel Grondwater.....</b>		<b>101</b>
<b>1</b>	<b>Ontwikkeling Stoftransportmodel.....</b>	<b>103</b>
1.1	Horizontale en verticale resolutie en interessegebied .....	103
1.2	Opbouw basismodel.....	104
1.3	Stabiliteit en simulatieperiode.....	106
<b>2</b>	<b>Resultaten interessegebied voor winning scenario's.....</b>	<b>109</b>
<b>3</b>	<b>Invoer voor het SOBEK oppervlaktewater model.....</b>	<b>113</b>
3.1	Modelaanpassing waterlopen en infiltratieweerstand .....	114
3.2	Resultaten Delfland.....	115
3.3	Resultaat Lage Broekpolder.....	117
<b>4</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>119</b>

<b>5</b>	<b>Referentielijst gebruikte programma's.....</b>	<b>121</b>
<b>Deel IV – Kwaliteitsmodel Oppervlaktewater.....</b>		
<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>125</b>
<b>2</b>	<b>Aanpassingen waterkwantiteit schematisatie.....</b>	<b>127</b>
2.1	Neerslag modellering.....	129
2.2	Peilregulatie, uit- en inlaten.....	130
2.3	Extra polders.....	130
2.4	Laterale debieten.....	132
2.5	Randvoorwaarden.....	132
<b>3</b>	<b>Aanpassingen waterkwaliteit schematisatie.....</b>	<b>133</b>
3.1	Randvoorwaarden.....	133
<b>4</b>	<b>Modelresultaten.....</b>	<b>135</b>
4.1	Analyse punt locaties.....	135
4.2	Ruimtelijke spreiding.....	141
4.3	Waterbalansen.....	142
<b>5</b>	<b>Conclusies.....</b>	<b>145</b>
<b>6</b>	<b>Referenties.....</b>	<b>146</b>
<b>Deel V – Geotechnisch Model.....</b>		
<b>1</b>	<b>Geotechnisch Model.....</b>	<b>149</b>
1.1	Inleiding.....	149
1.2	Omvang gebied.....	149
<b>2</b>	<b>Beschrijving ondergrond.....</b>	<b>151</b>
2.1	Geologische gegevens.....	151
2.2	Modellering.....	152
2.3	Beschrijving van de ondergrond.....	153
<b>3</b>	<b>Modelparameterisatie.....</b>	<b>155</b>
3.1	Geotechnische gegevens en betrouwbaarheid.....	155
<b>4</b>	<b>Berekeningsmethoden.....</b>	<b>157</b>
<b>5</b>	<b>Modeluitkomsten.....</b>	<b>159</b>
<b>6</b>	<b>Geotechnische effecten van winningreductie.....</b>	<b>161</b>
6.1	Optredende grondmechanische mechanismen.....	161
6.2	Opbouw van model voor bepaling van rijzingeffecten.....	162
6.3	Zakking van funderingen door grondwaterstijging.....	168
6.4	Conclusie uit de rijzings- en zakkingsberekeningen.....	169
6.5	Snelheid van rijzing.....	169
<b>7</b>	<b>Uitwerking schadeprognose.....</b>	<b>171</b>

7.1	Inventarisatie funderingen .....	171
7.2	Uitwerking schadeprognose panden met staalfundering.....	175
7.3	Aanbevelingen voor afbouw van de onttrekking en monitoring.....	180
<b>8</b>	<b>Controleberekeningen rijzingsmodel .....</b>	<b>181</b>
8.1	Aanpak van de controle .....	181
8.2	Controle van de in het rekenmodel ingevoerde bodemprofielen .....	182
8.3	Controle van in het model ingevoerde initiële grondwaterstanden.....	183
8.4	Controle van ingevoerde zettings/rijzingsparameters .....	185
8.5	Resultaten van de controleberekeningen.....	187
<b>9</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>191</b>
	<b>Addendum .....</b>	<b>193</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Ten noordwesten van het centrum van Delft ligt het terrein van DSM Gist. In 1916 zijn de voorgangers van DSM Gist begonnen met grondwateronttrekkingen ten behoeve van koeling van hun industriële processen. In de loop van de tijd zijn de activiteiten uitgebreid en daarmee de onttrokken hoeveelheid grondwater. In 1997 heeft DSM Gist een vergunning verkregen voor het onttrekken van 13,5 miljoen m<sup>3</sup> grondwater per jaar.

DSM heeft eind 2004 aangekondigd een groot deel van de onttrekking niet meer nodig te hebben voor bedrijfsprocessen, en dat zij op termijn de grondwateronttrekking volledig willen beëindigen. Delft en omgeving zal daarom in de komende jaren moeten anticiperen op de mogelijke veranderingen in het onttrekkingsregime van de winning. Eerder onderzoek toonde aan dat reductie of sluiting van de winning veranderingen teweeg kan brengen op de thema's Grondwaterstijging, Geotechniek en Waterkwaliteit.

In het kader van het onderzoeksprogramma Delft Cluster is onderzoek ingezet naar de effecten van de reductie en/of sluiting op het (grond)watersysteem en de ondergrond. Het onderzoek is uitgevoerd door de TNO (Business unit Bodem en Grondwater), WL Delft Hydraulics en GeoDelft in directe samenwerking met de provincie Zuid Holland, het Hoogheemraadschap van Delfland en de gemeente Delft. Vanaf januari 2008 zijn de drie organisaties achter de uitvoerende partijen door een fusie samengekomen in het nieuwe onderzoeksinstituut Deltares.

## 1.2 Gerelateerde rapportages

In het kader van het Delft Cluster onderzoek zijn een viertal rapportages verschenen.

In 2005 is de **Quickscan DSM-spoorzone** (Gehrels e.a. 2005) uitgebracht waarin de problematiek rond reductie van de winning op kwalitatieve wijze is verkend en waarin aanbevelingen voor nader onderzoek zijn geformuleerd. Er wordt in de tekst regelmatig verwezen naar deze publicatie. Dat gebeurt dan eenvoudig door te verwijzen naar 'de Quickscan'.

Onderdeel van het onderzoek is het advies om een **integraal monitoringnetwerk** in te richten om toekomstige ontwikkelingen rond de winning te kunnen volgen, te kunnen verklaren en het te ontwikkelen modelinstrumentarium te optimaliseren. Een beschrijving van het voorgestelde netwerk is afzonderlijk gerapporteerd (Roelofsen 2008).

Uitspraken over zowel de effecten van reductie als de efficiëntie van maatregelen zijn gebaseerd op berekeningen met de ontwikkelde modelinstrumenten. Het betreft een grondwater model voor kwantiteit en kwaliteit, een oppervlaktewatermodel en een bodemdalingsmodel.

Het voorliggende **Technische Rapportage** is de beschrijving van de totstandkoming van die afzonderlijke instrumenten en is gericht op een technisch publiek. Daardoor

vormt het de gedetailleerde achtergrondinformatie bij het hoofdrapport en noodzakelijke toelichting voor toekomstige gebruikers van de modellen. Het **Hoofdrapport** met daarin een opzichzelfstaande **Managementsamenvatting** is de centrale publicatie van het Delft Cluster onderzoek. Het bevat naast een toelichting op de onderzoeksmethode een samenvatting van de ontwikkelde modellen en een overzicht van de berekende effecten. De effecten zijn vervolgens input geweest voor een maatschappelijke kosten baten analyse. Het rapport sluit af met een doorzicht naar de toekomstmogelijkheden van de winning.

### 1.3 Leeswijzer Technisch Rapport

Deze rapportage bevat de beschrijving van de afzonderlijke modellen en is om die reden opgebouwd uit 5 delen.

Deel I beschrijft de totstandkoming van de geo(hydro)logie van de ondergrond. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen Pleistoceen en Holoceen waarbij het Holoceen zowel regionaal als ook in meer detail lokaal is gemodelleerd.

Het kwantiteitsmodel voor grondwater wordt beschreven in Deel II. Daarin komen alle gemodelleerde processen (modules) aan de orde als ook de ijking en een beschrijving van de modelschil iMOD.

Gebaseerd op het kwantitatieve grondwatermodel is het stoftransportmodel ontwikkeld. Deel III gaat uitgebreid in op de totstandkoming daarvan met aandacht voor de uitwisseling van grondwaterflux en –concentratie naar het oppervlaktewater.

De beschrijving van het Kwaliteitsmodel Oppervlaktewater komt in Deel IV aan de orde. Het beschrijft de uitbreiding van het bestaande Sobek model en gaat uitgebreid in op de uitkomsten.

Het laatste deel is gereserveerd voor een toelichting op het Geotechnische Model. Het geeft niet alleen een beschrijving van de modelontwikkeling en de resultaten maar gaat ook uitgebreid in op de gevolgen van bodembeweging op panden in het invloedsgebied.



# Deel I –Geo(hydro)logie van de ondergrond

Deel I van het technische rapport geeft een toelichting op de totstandkoming van de ondergrondparameters die ten grondslag liggen aan de rekenmodellen. In drie afzonderlijke hoofdstukken komen de verschillende onderdelen van deze geologische parameterisering aan de orde. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de geologie van de holocene deklaag en het pleistoceen.

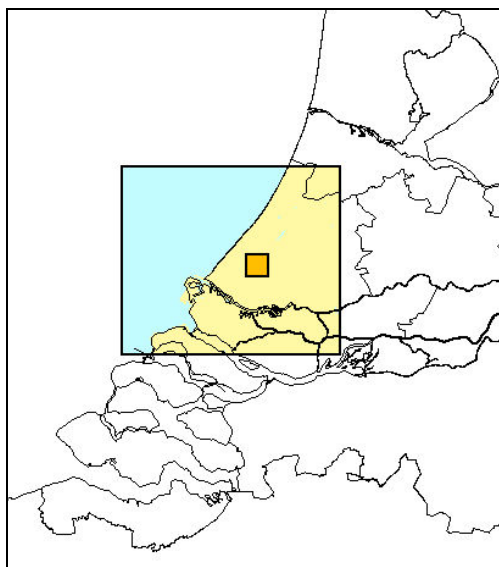
Het ondergrondmodel van het pleistoceen is gebaseerd op de informatie uit het Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem (REGIS) van TNO en wordt toegelicht in hoofdstuk 3. De eerste twee hoofdstukken bespreken de 3D modellering van de deklaag waarbij hoofdstuk 1 zich richt op regionale modellering en hoofdstuk 2 de modellering beschrijft van een detailgebied rondom de winning waar een hoger detailniveau is nagestreefd.



# 1 Regionaal geo(hydro)logisch model van de deklaag

## 1.1 Achtergrond

Het regionale deklaagmodel beschrijft de weerstand (C-waarde) en transmissiviteit (KD-waarde) van de Holocene afzettingen in 5 gestapelde modellagen voor het gebied tussen X: 40.000 – 110.000 en Y: 420.000 – 480.000, met uitzondering van de Noordzee (Figuur 1.1). Het Holoceen in dit gebied bestaat uit een complexe opbouw van kleiige tot zandige afzettingen van mariene (kustnabije) of fluviatiele oorsprong. Onder andere van belang zijn gebieden met fluviatiele stroomgordels of zandige getijdegeulen die mogelijk in contact staan met het pleistocene zandpakket dat direct onder de deklaag ligt. Met name in deze regio's is sprake van een dunnere en dus kwetsbaardere deklaag.



Figuur 1.1: Ligging van het regionale modelgebied en het centrumgebied (donkergeel)

Het gebied kent belangrijke veenlagen. Ten eerste de sterk gecompacteerd Basisveen Laag die een belangrijke scheiding vormt tussen het pleistocene zandpakket en de daarboven liggende deklaag. Ten tweede het Hollandveen Laagpakket dat vooral dikke veenlagen buiten de ingepolderde gebieden (bovenland) bevat en een belangrijke factor kan zijn voor bodemdaling (veenoxidatie boven grondwaterspiegel).

Het regionale deklaagmodel omvat een ruimtelijke (3D) verbreiding van belangrijke lithologische klassen (grondsoorten) welke is bepaald op basis van boorbeschrijvingen uit DINO (Databank Informatie Nederlandse Ondergrond) en waaraan specifieke waarden voor de geohydrologische parameters kunnen worden gehangen. Uit dit 3D model zijn vervolgens voor verschillende niveaus (modellagen) grids met eigenschappen (dikte, diepteligging, C-waarde, KD-waarde) gegenereerd.

## 1.2 Processchema

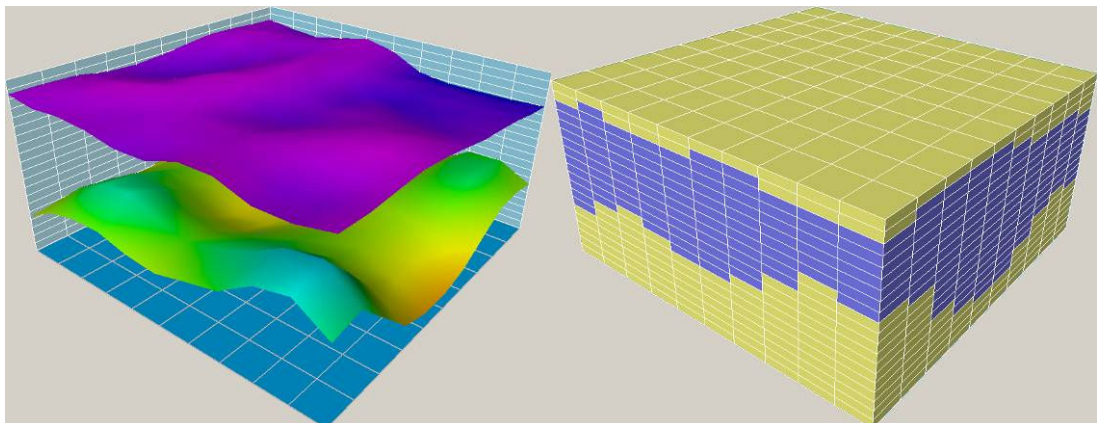
Voor de berekening van de C- en KD-waarden binnen het Holocene deklaagmodel zijn de volgende stappen doorlopen. De afzonderlijke stappen worden hieronder nader toegelicht.

- 1) Opzet van het 3D-grid aan de hand van geologische laagdata uit REGIS;
- 2) Bevraging en bewerking van boordata uit DINO tot 3D lithologische dataset;
- 3) Interpolatie van de dataset naar 3D lithologisch model;
- 4) Opdeling van het 3D lithologisch model in 5 modellagen op basis van regionaal correleerbare trends en de Holocene deklaag kartering in het kerngebied;
- 5) Hydrologische parameterisatie van het 3D lithologische model en bepaling van de cumulatieve C- en KD-waarde voor iedere modellaag.

## 1.3 Toelichting modelbouw

### 1.3.1 Opzet 3D grid

Het 3D-grid vormt de basis voor het lithologische model. Het bestaat uit een regelmatige stapeling van kubusvormige cellen (Figuur 1.2) waaraan verschillende attributen (bijvoorbeeld lithologie, C-waarde etc.) kunnen worden toegekend. Iedere cel heeft een afmeting van 100m x 100m x 0,5m. De waarde van het gekoppelde attribuut is representatief voor het volume dat de cel afbakent.



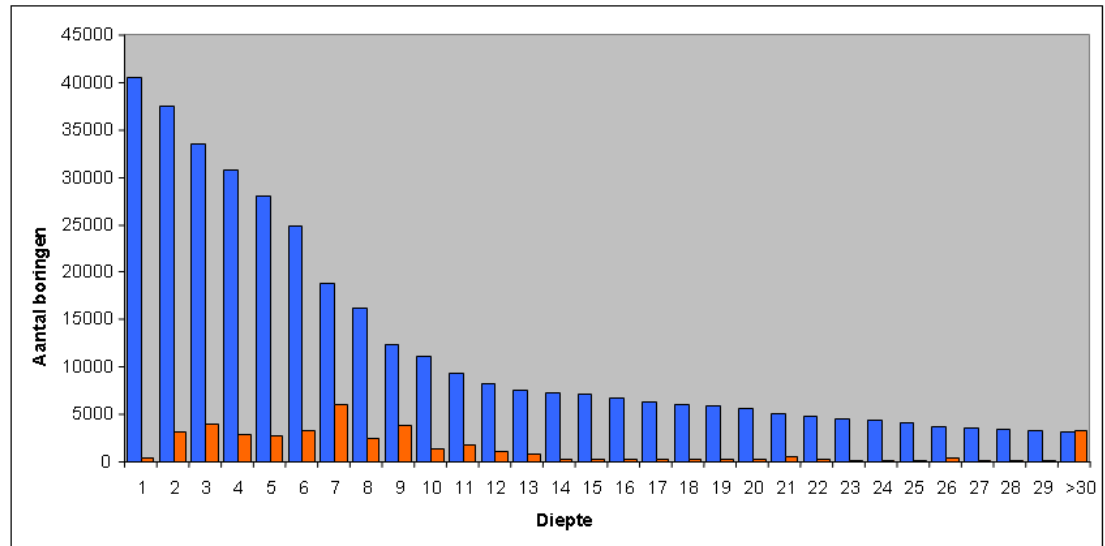
Figuur 1.2: Schematische representatie van het 3D gridmodel. De linkerfiguur geeft de top en basis van het model weer als ruimtelijke vlakken. De rechterfiguur geeft de geselecteerde cellen (blauw) tussen top en basis weer in het 3D gridmodel.

De totale dikte van het 3D-grid omvat alle Holocene afzettingen binnen het bereik van het regionale model. Aan de hand van laaggegevens uit REGIS2 (maaielveldhoogte en diepteligging basis Holocene afzettingen) zijn de cellen in het 3D grid geselecteerd die binnen de Holocene deklaag liggen (Figuur 1.2). Verdere berekeningen zijn binnen deze selectie uitgevoerd. Voor het centrumgebied (zie hoofdstuk 2) is het lokale lithologische model van de holocene deklaag direct overgenomen.

### 1.3.2 Bevraging en bewerking lithologische data

Voor de 3D lithologische dataset van het regionale model zijn laagbeschrijvingen van ongeveer 41.000 boringen uit DINO bevroegd. Figuur 1.3 toont een grafiek met de

aantallen boringen die een bepaalde einddiepte bereiken. Iedere laagbeschrijving omvat een aantal lithologische kenmerken zoals hoofdgrondsoort, korrelgrootte, bijmengingen, etc. De kwaliteit van de laagbeschrijvingen is afhankelijk van een aantal factoren waaronder het gebruikte boorsysteem (handboring of machinale boring) en de instantie of persoon die de monsters heeft beschreven (volledigheid van de laagbeschrijvingen).



Figuur 1.3: Aantal boringen binnen regionaal modelgebied dieper dan gegeven interval (blauw) en aantal boringen met gegeven einddiepte (oranje).

Het merendeel van de beschrijvingen is afkomstig van handboringen die gezet zijn in het kader van geologische karteringen door TNO en de voormalige Rijks Geologische Dienst (RGD). De handboringen hebben over het algemeen een einddiepte tussen 1 en 6 meter onder maaiveld en geven voor dit interval het meest gedetailleerde beeld van de samenstelling van de ondergrond. Voor het diepere deel (>5 à 6 m onder maaiveld) is het model aangewezen op diepere machinale boringen. Aangezien deze boringen meestal geroerde monsters opleveren, geven ze een minder gedetailleerd beeld van de ondergrond. In tegenstelling tot het afzonderlijk in detail gemodelleerde centrumgebied zijn voor het regionale deklaagmodel geen sondeergegevens gebruikt.

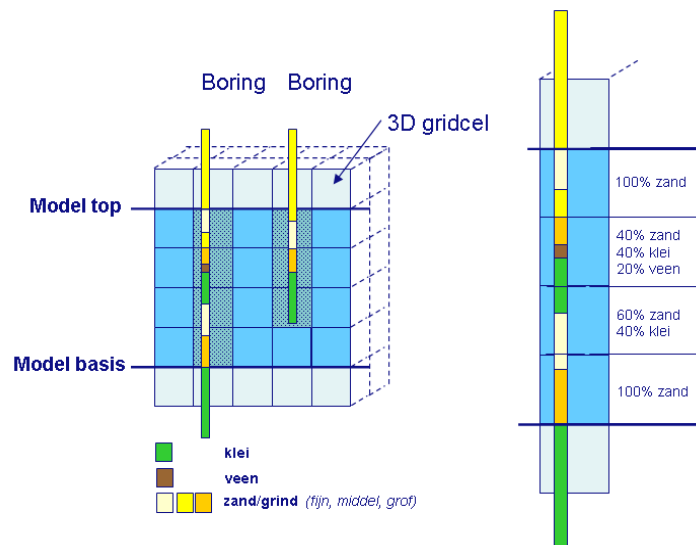
Aan de hand van de beschreven kenmerken is iedere laagbeschrijving ingedeeld in één van de volgende lithologische hoofdklassen (discretisatie):

- **Z:** zand en grind;
- **K:** klei en leem;
- **V:** veen en gyttja;
- **O:** overig (o.a. hout, schelpen, etc.).

Op basis van de mediaangegevens is de hoofdklasse zand en grind (Z) verder onderverdeeld in de volgende klassen:

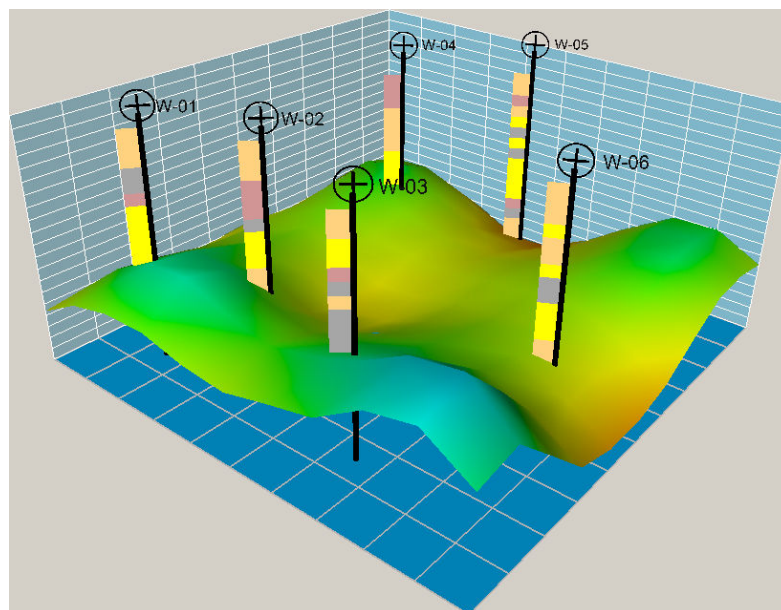
- **Zg:** zeer grof – uiterst grof zand en grind (mediaan >300 µm);
- **Zm:** matig fijn – matig grof zand (mediaan 150 – 300 µm);
- **Zf:** uiterst fijn – zeer fijn zand (mediaan 63 – 150 µm).

Binnen de hoofdklasse klei is het aandeel zandige klei (**Kz**) bepaald.



Figuur 1.4: Schematische weergave van opschaling van de lithologische gegevens uit de boringen naar het 3D gridmodel.

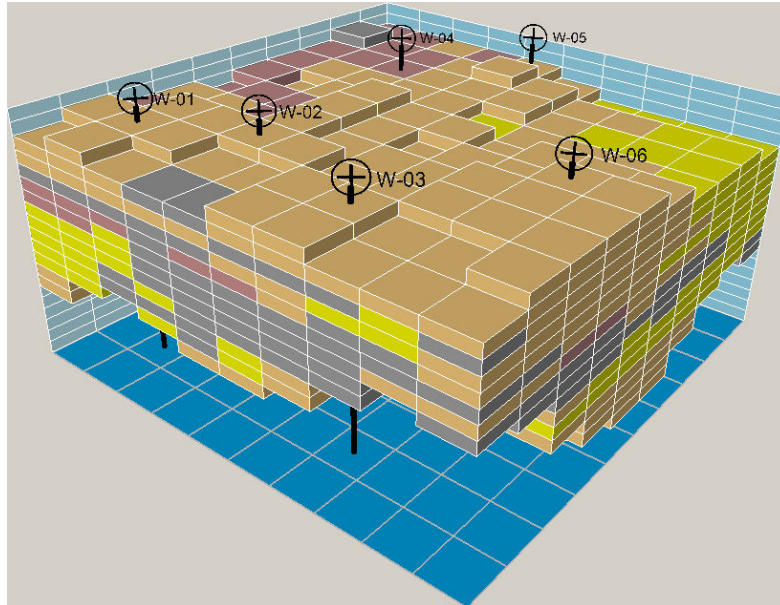
Na de discretisatie zijn alle lagen in de boringen gesneden met het 3D-grid (regularisatie). Hierbij is voor iedere cel die doorsneden wordt door een boring het aandeel van iedere lithologische klasse bepaald (Figuur 1.4). Indien slechts 1 lithologie binnen een cel voorkomt, is het aandeel hiervan op 100% gesteld. Bij het voorkomen van meerdere lithologieën binnen 1 cel (bijvoorbeeld als een lithologische laaggrens binnen de cel valt of meer dan 1 boring de cel doorsnijdt), is het aandeel van iedere lithologie evenredig verdeeld naar het voorkomen ervan. De som van alle aandelen in iedere cel is altijd 100%. De 3D dataset met aandelen van de lithologische klassen (Figuur 1.5) vormt de basis voor de interpolatie.



Figuur 1.5: Schematische weergave van de 3D lithologische dataset (op de locatie van de boringen) in het 3D gridmodel. Het groengele vlak geeft de basis van het model weer.

### 1.3.3 Vulling van het 3D grid (interpolatie)

In de lege (niet doorboorde) cellen is het aandeel van de verschillende lithologische klassen bepaald door 3D interpolatie van de aandelen in de 3D dataset. Voor de interpolatie is het kriging algoritme gebruikt met een zoekstraal van 4 km x 4 km x 0,5 m. Na de interpolatie zijn de aandelen daar gecorrigeerd waar het totaal van de geïnterpoleerde aandelen afwijkt van 100% (normalisatie). Figuur 1.6 geeft een schematische weergave van het 3D gridmodel met de geïnterpoleerde lithologieën.



Figuur 1.6: Schematische weergave van het 3D gridmodel waarin alle cellen een geïnterpoleerde lithologie bevatten.

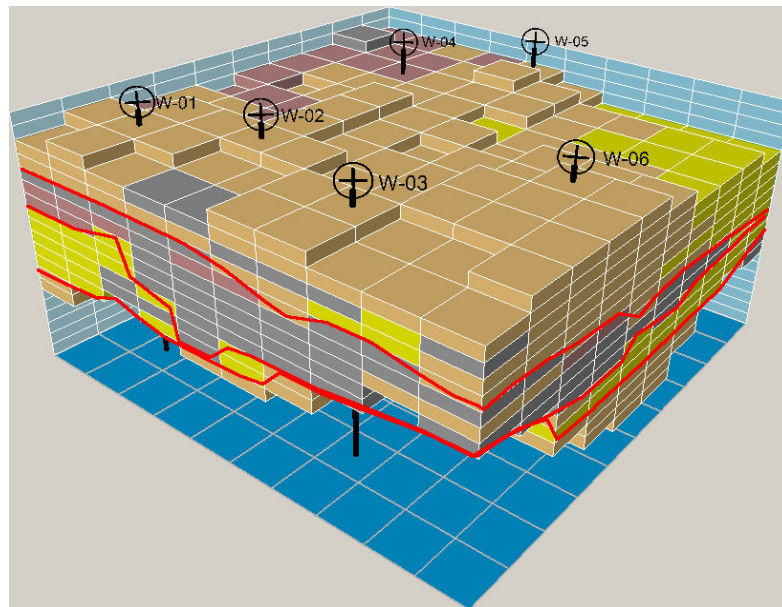
### 1.3.4 Opdeling in modellagen

Uit het 3D lithologische model zijn 60 verticale profielen gegenereerd met een gemiddelde tussenruimte van 2 km (30 noord-zuid en 30 oost-west profielen). In deze profielen zijn 5 modellagen gedigitaliseerd op basis van correleerbare trends met als uitgangspunt de laagopbouw van het centrale deklaagmodel. De lagen zijn als volgt gedefinieerd:

- Laag 1: De bovenste kleiige tot zandige laag (hoofdzakelijk Laagpakket van Walcheren), **antropogene** afzettingen (opgebracht materiaal in stedelijk gebied) en jonge **duinafzettingen** (Laagpakket van Schoorl). Deze laag ligt meestal op venen van het Hollandveen Laagpakket en is grotendeels afwezig binnen de polders.
- Laag 2: De **veenlagen** in het Hollandveen Laagpakket die boven het Laagpakket van Wormer en de Formatie van Echteld liggen. Lokaal omvat deze laag ook dunne kleilagen van: het Laagpakket van Wormer, het Laagpakket van Walcheren of de Formatie van Echteld.
- Laag 3: Hoofdzakelijk **mariene kleien** binnen het Laagpakket van Wormer en kustnabije zandige afzettingen van het Laagpakket van Zandvoort. In grote delen van het gebied wordt deze laag van de onderliggende laag gescheiden door een regionaal correleerbare veenlaag. In het meest westelijke deel is deze laag moeilijk te onderscheiden van de onderliggende Laag 4.

- Laag 4: Kleiige tot **zandige fluviatiele afzettingen** van de Formatie van Echteld (inclusief stroomgordels) en zandige getijde-afzettingen binnen het Laagpakket van Wormer.
- Laag 5: De **Basisveen Laag** bestaande uit sterk gecompacteerd veen. Omdat deze laag erg dun is en derhalve slecht tot uiting komt in het lithologische model, is deze laag deterministisch gemodelleerd met een constante dikte van 0,5 m binnen de gekarteerde verbreding. In het westen is de Basisveen Laag veelal versneden door getijde-afzettingen van het Laagpakket van Wormer. In het oosten is deze versneden door Holocene stroomgordels. In werkelijkheid heeft de Basisveen Laag een minder continue verbreding omdat kleinere niet uitgekarteerde geulsystemen deze laag lokaal ook doorsnijden. Binnen het regionale model konden deze verbredingspatronen niet worden uitgekarteerd en is derhalve een meer continue verbreding aangenomen.

De gedigitaliseerde diepteligging van de verschillende laaggrenzen in de secties zijn geïnterpoleerd tot vlakdekkende horizons (Figuur 1.7). De zo verkregen modellagen geven een grove benadering van de grootschalige lithologische trends in het lithologische model ter ondersteuning van het hydrologische model. Hierbij dient te worden vermeld dat de modellagen niet gebruikt kunnen worden als lithostratigrafische modellagen. De laaggrenzen in het regionale gebied zijn soms minder goed vervolgbaar dan in het centrale gebied omdat de informatiedichtheid lager is (geen sonderingen gebruikt) en omdat er relatief gezien minder tijd in is gestoken. Ook zijn laaggrenzen dieper dan ~10 m onder maaiveld minder nauwkeurig uitgekarteerd in verband met de beperkte beschikbaarheid van diepe boringen met een goede datakwaliteit.



Figuur 1.7: Op basis van het geïnterpoleerde lithologische model worden modellagen gedefinieerd met overeenkomstige kenmerken. Van deze lagen worden de geohydrologische parameters bepaald.



### 1.3.5 Bepaling cumulatieve C- en K-waarden

Voor iedere modellaag is bepaald welke gridcellen van het lithologische model hier binnen vallen. Daarna is voor iedere cel een C- en Kd-waarde afgeleid door parameterisatie van de verschillende lithologische klassen. De onderstaande tabel geeft voor iedere lithologische klasse de gemiddeld minimale en maximale aangenomen C- en Kh-waarde per meter. Deze tabel is de meest recente maar voorlopige werktabel gemaakt door TNO (REGIS) voor de ondiepe Nederlandse ondergrond en is daarmee nog niet definitief. Voor de parameterisatie van de modellagen zijn de gemiddelde waarden gebruikt.

Lithologie	C-waarde (d/m)	Kh-waarde (m <sup>2</sup> /d)
Klei	294.12	0.0034
Veen	20.41	0.049
Basisveen	2500	0.0004
Anders	0.18	8.1
Zandige klei	24.39	0.041
Zand fijn	1.54	0.9
Zand middel	0.18	8.1
Zand grof	0.06	24.2

Als voorbeeld nemen we een cel (dikte 0,5 m) met 60% klei, 30% veen en 10% fijn zand. De C-waarde van deze cel wordt als berekend:

$$(0,6 * 294,12 \text{ d/m} + 0,3 * 20,41 \text{ d/m} + 0,1 * 1,54 \text{ d/m}) * 0,5 \text{ m} = 91,37 \text{ dagen}$$

De Kd-waarde wordt op een vergelijkbare manier berekend:

$$(0,6 * 0,0034 \text{ m/d} + 0,3 * 0,049 \text{ m/d} + 0,1 * 0,9 \text{ m/d}) * 0,5 \text{ m} = 0,053 \text{ m}^2/\text{d}$$

De cumulatieve C-waarde en Kd-waarde voor iedere laag is bepaald door alle celwaarden binnen de modellaag verticaal te sommeren.

## 1.4 Resultaten

Voor iedere Holocene modellaag zijn grids gemaakt met een resolutie van 100 m bij 100 m. Er zijn grids van de dikte, de diepte van de top en de basis, de cumulatieve gemiddelde C-waarde en de gemiddelde KD-waarde.

Alle grids zijn beschikbaar in binair Arc-grid formaat en Arc-ascii formaat. Deze informatie is gebruikt als invoer voor het complete ondergrond model.

Tevens zijn de grids met de hierboven beschreven lithologische discretisatie codes beschikbaar (100 x 100 x 0,5 m).



## 2 Geo(hydro)logisch detailmodel van de deklaag

### 2.1 Achtergrond

Het centrale deklaagmodel beschrijft lithologie en weerstand (C-waarde) en transmissiviteit (Kd-waarde) van de holocene afzettingen voor het gebied tussen X (80.000, 87.000) en Y (445.000, 452.000). Voor een beschrijving van de schematische geologische opbouw wordt verwezen naar hoofdstuk 1, Regionaal deklaagmodel. Het centrale deklaagmodel bevat per gridcel van 25×25×0,25 meter een schatting van de meest waarschijnlijk voorkomende lithologie. Deze is bepaald op basis van boringen en sonderingen. Het model is tevens opgedeeld in een aantal subhorizontale lagen, zoals beschreven voor het regionaal model. Aan de hand van de gemodelleerde lithologieën kunnen per laag C- en Kd-waarden worden berekend.

### 2.2 Uitwerking

Voor de berekening van de C- en Kd-waarden binnen het deklaagmodel zijn de volgende stappen doorlopen. De afzonderlijke stappen worden hieronder nader toegelicht.

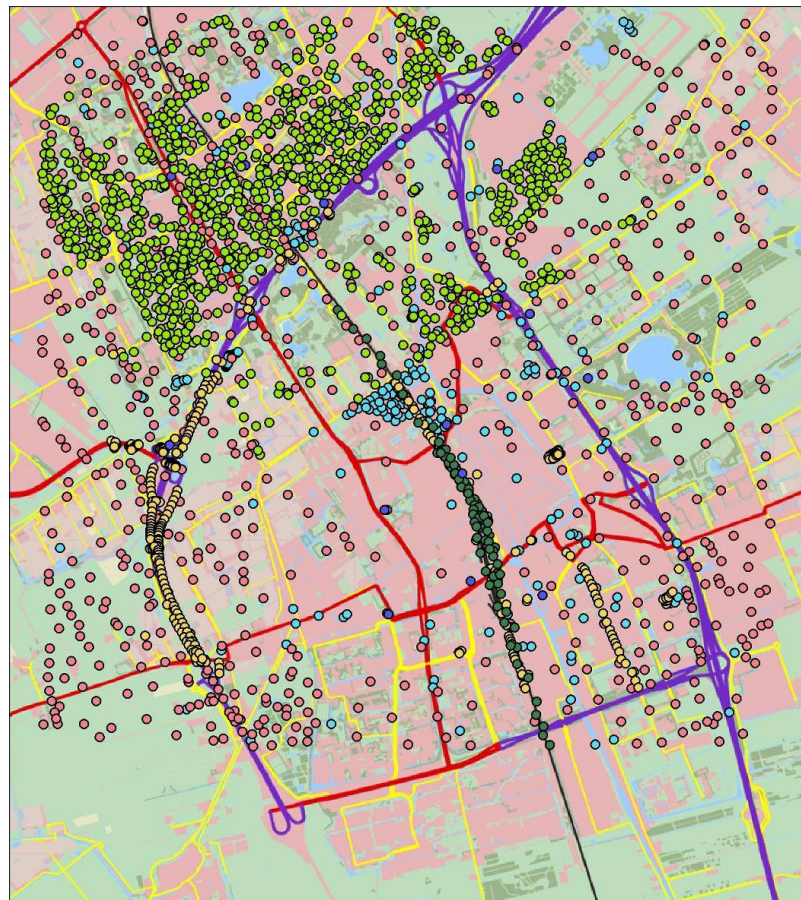
- 1) Definitie van het grid;
- 2) Beschrijving brongegevens;
- 3) Bewerking van boor- en sondeerdata tot 3D lithologische dataset;
- 4) Interpolatie van de dataset naar 3D lithologisch model;
- 5) Hydrologische parameterisatie van het 3D lithologische model en bepaling van de cumulatieve C- en Kd-waarde voor iedere modellaag.

### 2.3 Griddefinitie

Het gemodelleerde centrale gebied ligt tussen de RD/NAP XYZ-coördinaten (80.000, 445.000, -20,0) en (87.000, 452.000, 0,75). De afmetingen zijn 7.000×7.000×20,75 meter. De gridgrootte is 25×25×0,25 (X×Y×Z) meter. Het grid bestaat uit 281×281×84 (X×Y×Z) cellen. De definitie van het grid is dusdanig gekozen dat de onderkant overal lager ligt dan de top van het pleistocene zand (= top eerste watervoerend pakket). In bebouwd gebied (gemeentes Delft en Rijswijk), langs snelwegtaluds (A4, A13) en op sommige plaatsen tussen Delft en Rijswijk in (heuvels tot NAP+18m) valt het maaiveld boven dit grid; hier wordt verondersteld dat het gaat om opgehoogd terrein (zand).

### 2.4 Brongegevens

Voor het centrale deklaagmodel zijn boringen, sonderingen (analoog en digitaal) en aanvullende geologische gegevens gebruikt.



#### Legenda

● boring_diep	● gd_sondering
● boring_ondiep	● sondering_spoorzone
● rijswijk_sondering	● tno_sondering

Figuur 2.1: Overzicht van dichtheid en type gebruikte geologische data

#### 2.4.1 Boringen

De DINO database bevat binnen het gebied 771 'ondiepe' en 321 'matig diepe' boringen aangetroffen. 'Ondiepe' boringen zijn meestal handboringen, 'matig diepe' boringen meestal machinaal gezet. Een kwalitatieve beschrijving van deze types boringen is gegeven in hoofdstuk 1, het Regionaal deklaagmodel. De ondiepe boringen bereiken in het gebied de top van het pleistocene zand (gemiddeld NAP-17m) niet, de meeste matig diepe doen dit wel. Figuur 2.2 en Figuur 2.3 geven een overzicht van de geïnterpreteerde boringen in twee profielen.

#### 2.4.2 Sonderingen

Verschillende sets digitale sonderingen waren beschikbaar:

- GeoDelft 308
- GeoDelft archief 54 (alleen conusweerstand)
- Fugro spoorzone 80
- TNO 17

Tevens waren van de Gemeente Rijswijk ruim 5700 gescande sondeerlogs beschikbaar in TIF formaat.

Voor digitale sonderingen geldt dat de lithologie goed is af te leiden uit een combinatie van conusweerstand en wrijvingsgetal. Wanneer alleen de conusweerstand beschikbaar is, dan zijn de sonderingen alleen gebruikt om de top van het pleistocene zand uit af te leiden (pleistoceen zand is in het gebied dicht gepakt en heeft een zeer hoge conusweerstand).

Het afleiden van lithologie uit gescande sondeerlogs is zeer tijdrovend en paste niet binnen het beschikbare budget. Daarom is ervoor gekozen de Rijswijk-sonderingen alleen te gebruiken om de top van het pleistocene zand vast te stellen, en om te bepalen of er wel of niet een slecht doorlatende laag (laag 5 uit het regionale model) direct op het pleistocene zand ligt.

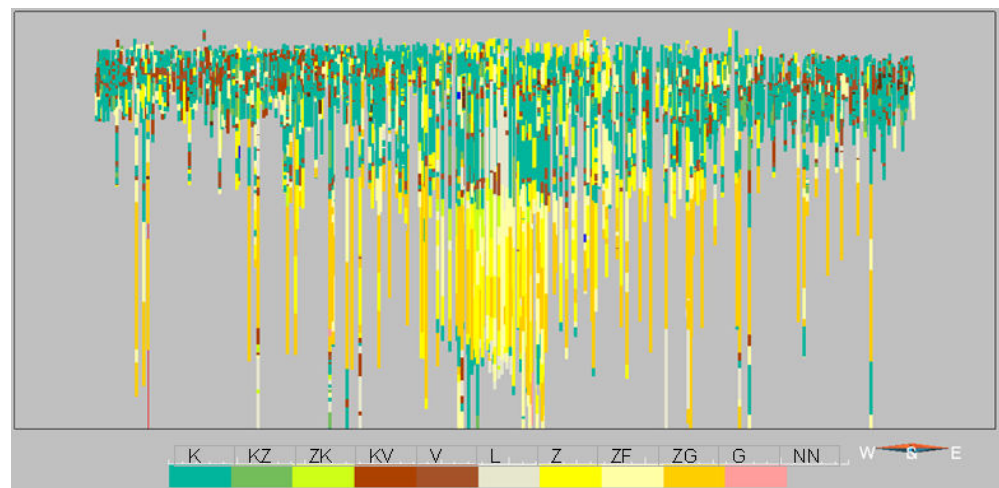
### 2.4.3 Overige gegevens

Aanvullend waren beschikbaar:

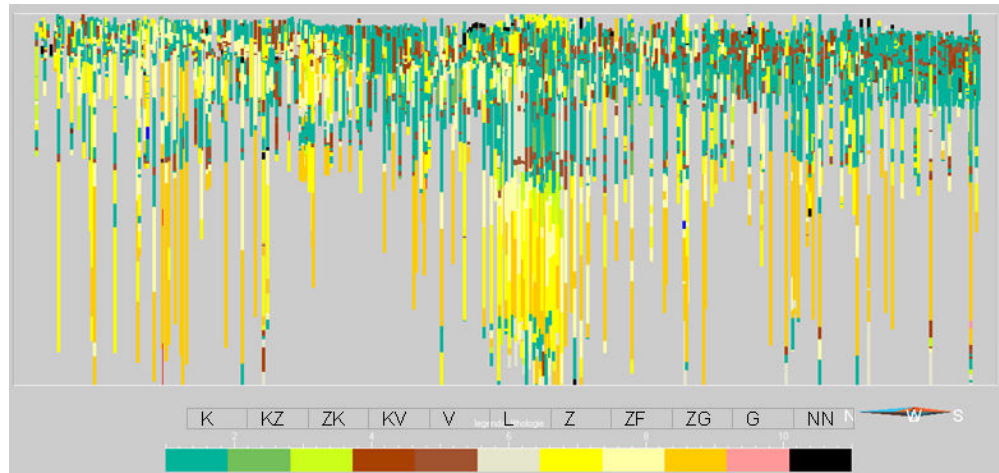
- Geologische kaarten en profielen (TNO);
- Geotechnische profielen (Geodelft);
- Geo-archeologische kaart (gemeente Delft);
- Gantel-systeem (gemeente Delft, TNO).

Deze overige gegevens zijn slechts als referentie gebruikt om diverse redenen van technische aard:

- lage resolutie;
- geen lithologische maar stratigrafische informatie beschikbaar;
- matige kwaliteit.



Figuur 2.2: Projectie van boringen op oostwest profielvlak. Lengte profiel 7km, hoogte profiel van NAP-50 tot NAP+5m (Legenda zie onder paragraaf 2.4.4)



Figuur 2.3: Projectie van boringen op noordzuid profielvlak. Lengte profiel 7km, hoogte profiel van NAP-50 tot NAP+5m. (Legenda zie onder paragraaf 2.4.4).

### Gantel-systeem

Op zowel de geologische kaart van de TNO als de geo-archeologische kaart van de Gemeente Delft is een globale contour van het holocene Gantel-geulsysteem zichtbaar. De Gantel komt voor in het noordwesten van het centrale gebied. De informatie uit de twee kaarten is niet direct gebruikt bij het maken van het lithologisch model van het centrale deklaagmodel. Beide kaarten zijn namelijk profieltypekaarten, die wel laagopvolgingen maar geen dikte geven. Daarom is de kaart niet bruikbaar om het geullichaam in de diepte te positioneren. Bovendien is de getekende contour van de Gantel breder dan het echte geullichaam, en dus ook niet voor bruikbaar voor positionering in het platte vlak. Aan de andere kant is de Gantel wel duidelijk zichtbaar in het sondeerprofiel dat langs de A4 loopt. Figuur 2.4 toont de geul aan de noordzijde van het profiel (links), in gele kleuren in laag 5. Het in 3D karteren van het geullichaam is dan ook wel mogelijk, maar binnen de grenzen van dit project niet haalbaar.

#### 2.4.4 Boringen

Omdat de beschikbare gegevens voor het centraal model sterk afwijken van die van het regionaal model, is ook de indeling in lithologieën licht afwijkend. De onderscheiden lithologieën zijn:

- Zand (Z, ZF=fijn zand, ZG=grof zand, G=grind);
- Klei en leem (K, L);
- Veen en gyttja (V);
- Zandige klei / kleiig zand (ZK, KZ);
- Venige klei / kleiig veen (KV).

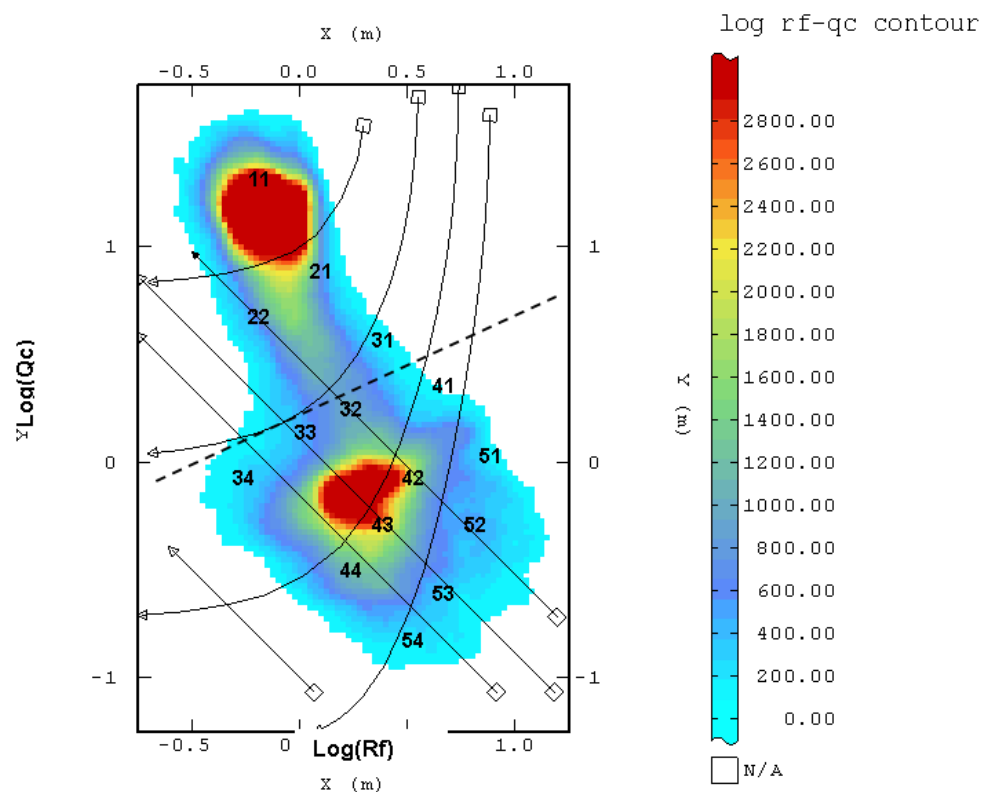
Als zandige klei / kleiig zand is genomen een hoofdlithologie zand met bijmenging klei en/of silt (matig tot uiterst kleiig/siltig), en hoofdlithologie klei met bijmenging zand (matig tot uiterst zandig). Als venige klei / kleiig veen is genomen een hoofdlithologie klei met humus bijmenging (matig tot sterk humeus), en hoofdlithologie veen of gyttja met bijmenging klei (matig tot sterk kleiig).

Anders dan bij het regionaal model is de hoofdlithologie zand niet verder onderverdeeld naar korrelgrootte; hiervoor waren in het centraal gebied te weinig gegevens beschikbaar.

### 2.4.5 Sonderingen

Een sondering neemt niet direct lithologie waar, maar meet de weerstand van de punt van de sondeerconus (conusweerstand  $Q_c$ ), en de wrijving langs de schacht van de sondeerstang (plaatselijke wrijving of kleeft  $F_s$ ). Zand heeft over het algemeen een hoge conusweerstand en lage plaatselijke wrijving, klei een lage conusweerstand en hoge kleeft. De ratio plaatselijke wrijving / conusweerstand wordt wrijvingsgetal genoemd ( $R_f$ ). Uit de conusweerstand en het wrijvingsgetal is de lithologie af te leiden. Veen wordt gekenmerkt door een groot wrijvingsgetal. Deze relatie is gebiedsafhankelijk en moet daarom voor ieder gebied empirisch worden vastgesteld.

Figuur 2.4 toont een contourplot van  $\log R_f$  (x-as) versus  $\log Q_c$  (y-as) voor de sonderingen in het studiegebied. Geplot is de punt dichtheid (aantal waarnemingen per oppervlakte in de grafiek). De hogere conusweerstand ( $\log(Q_c) > 0,5$ ) behoren tot de pleistocene zanden, de lagere conusweerstand ( $\log(Q_c) < 0,5$ ) zijn holocene zand, klei en veen. Het feit dat de gebieden voor (pleistoceen) zand, klei en veen in elkaar overlopen duidt erop dat ook de lithologieën geen distincte groepen zijn, maar dat er mengklassen bestaan zoals zandige klei, kleiig zand, venige klei, etc. Om tot een hanteerbare sondeer-lithologische indeling te komen is het nodig een classificatie door te voeren door grenslijnen in de sondeerplot te zetten (Figuur 2.4) die gebaseerd zijn op algemene geologische en geotechnische, en gebieds-specifieke kennis. Boringen kunnen hierbij gebruikt worden als referentie. De rechte lijnen in Figuur 2.4 geven de stevigheid van het materiaal aan (linksonder: slap, rechtsboven: stevig; vooral voor de slappe lithologieën als klei en veen). De kromme lijnen geven de pakking aan (linksboven: dicht gepakt, rechtsonder: los gepakt, vooral voor zand).

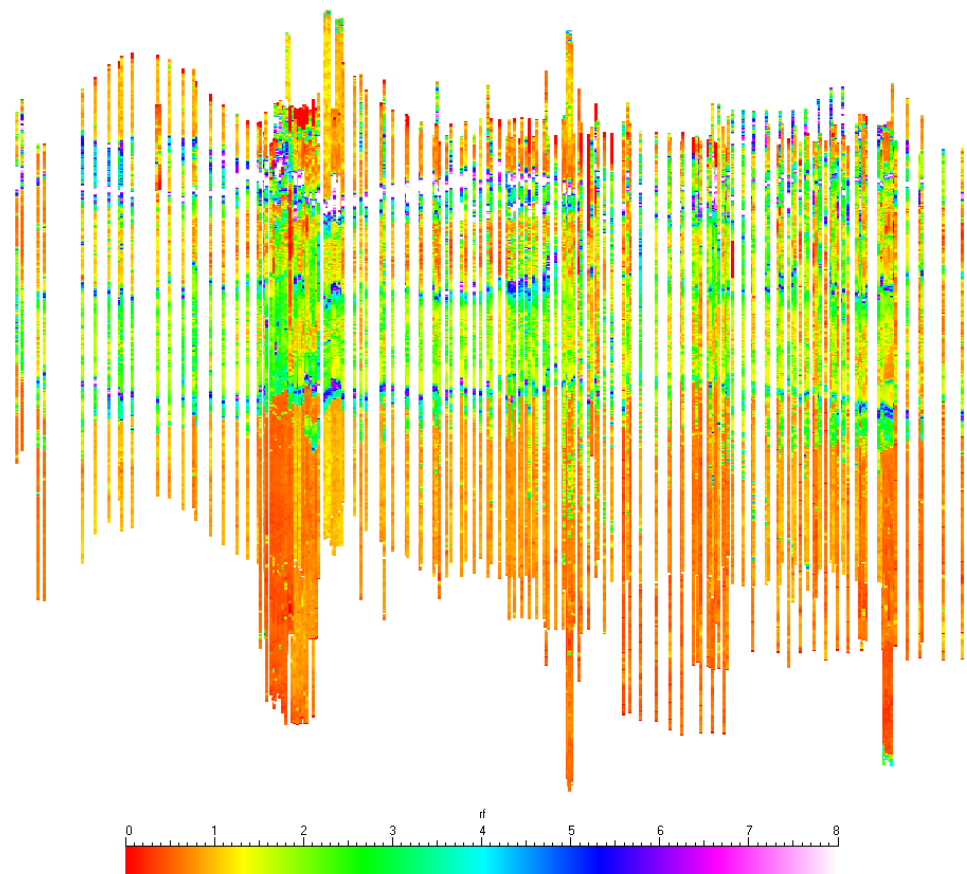


Figuur 2.4: Log-log  $R_f$ - $Q_c$  contourplot. Het bovenste maximum komt overeen met pleistoceen zand, het onderste met de holocene afzettingen (losgepakt zand, klei en veen). De nummers in de vakken refereren naar Tabel 2.1

Tabel 2.1: Sondeerlithologische klassen, met tussen haakjes de overeenkomende boorlithologie

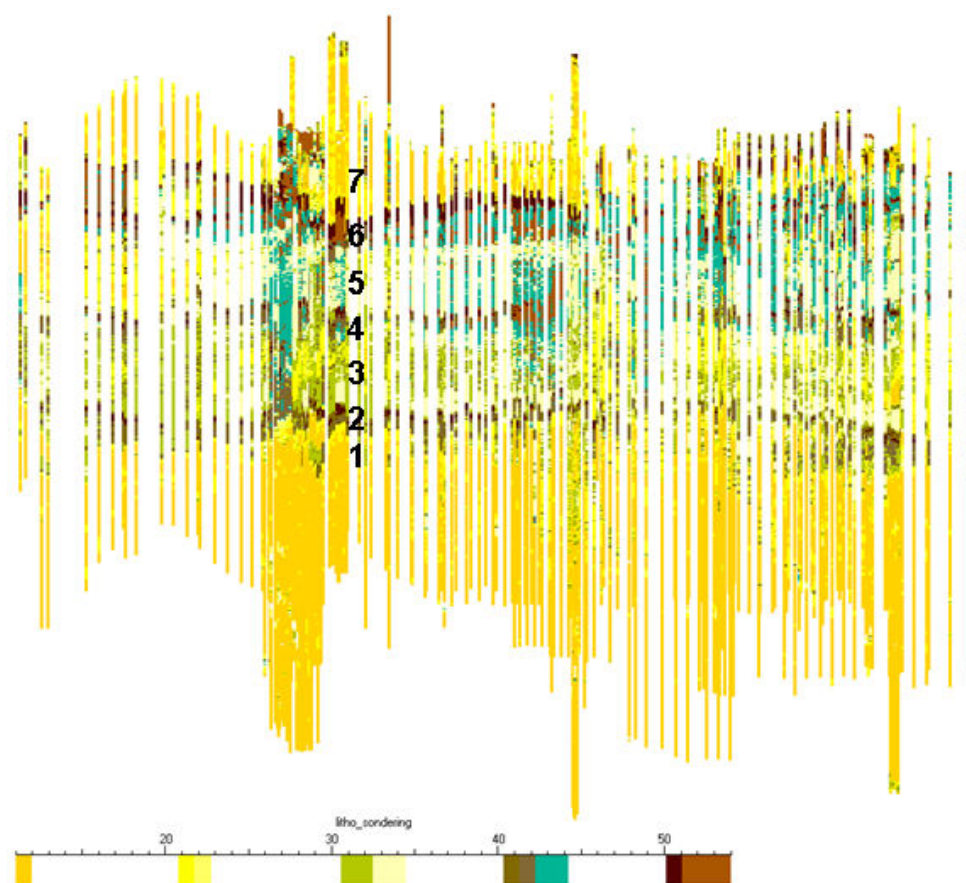
11	dicht zand (alleen pleistoceen)	41, 42	stevige siltige humeuze klei en matig vaste siltige humeuze klei (KV)
21, 22	matig gepakt zand (Z)	43, 44	slappe siltige klei (K)
31, 32	matig vast zandige klei en los gepakt siltig kleiig zand (KZ/ZK)	51	basisveen (V)
33, 34	losgepakt siltig zand en losgepakt schoon zand (Z)	52-54	Hollandveen (V)

De sondeerprofielen van Figuur 2.5 (wrijvingsgetal) en Figuur 2.6 (geclassificeerde lithologie) laten in groot detail de pleistocene en holocene afzettingen langs de A4 zien. Uit deze figuur wordt duidelijk dat zowel dikte als diepteligging van de ingeschakelde veenlagen varieert, dat de lagen wel tamelijk continu zijn, doch soms onderbroken. Deze lagen zijn binnen het detailgebied goed te vervolgen, maar zijn niet voldoende continu om ook overal in het regionale model te karteren.



Figuur 2.5: Noord-zuid sondeerprofiel langs A4 tussen Y=448700 en 445700 met wrijvingsgetal. Lengte profiel horizontaal 3km, vertikaal 40m. Noord is links op de figuur.





Figuur 2.6: Idem, met geïnterpreteerde lithologie (geel=zand, groen=klei, bruin=veen). Referentie dimensie horizontaal 3km, vertikaal 40m. De legendanummering komt overeen met die in Figuur 2.3.

Tabel 2.2: Laagcodering Figuur 2.6

Positie	#	Dominante kleur:	dominante lithologie:	naam	laag nummer (regionaal)
Boven	7	Oranje/geel	(ophoog-)zand	walcheren	1
	6	Wit/blauw	veen	hollandveen	2
	5	Oranje/geel/groen	Zand (links) tot klei (rechts)	wormer	3
	4	Blauw	Veen	hollandveen	(3)
	3	Groen/geel	Klei (links) tot zand (rechts)	echteld	4
Onder	2	Blauw/paars	klei, veen	wijchen, basisveen	5
	1	Oranje	zand (meest pleistoceen)	kreftenheye	-

## 2.5 Onderkant model

De onderkant van het detailmodel wordt gevormd door de top van de zandige afzettingen van de (pleistocene) Formatie van Kreftenheye. Dit betekent dat de klei van Wijchen, die hierop ligt en (ook) van Pleistocene ouderdom is, voor dit deklaagmodel is toegevoegd aan de holocene afzettingen.

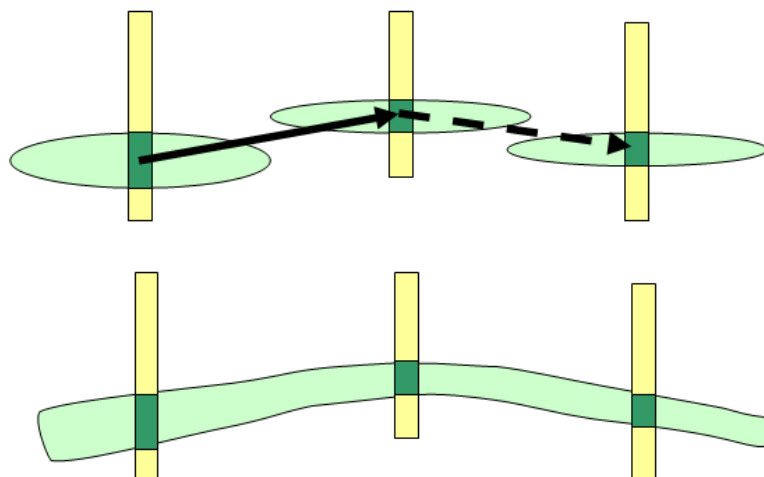
- 1) Uit de 'matig diepe' boringen is automatisch een 'diepte top pleistoceen zand' herkend door van de volgende veronderstellingen uit te gaan:
  - Laagvlak ligt tussen maximaal NAP-14 en minimaal NAP-20m
  - Eronder ligt zand met evt. slecht doorlatende lagen van maximaal 0,5 meter dik (klei en veen)
  - Erboven ligt veen en/of klei (basisveen en/of klei van Wijchen)
- 2) Voor het bepalen van hetzelfde vlak uit de sonderingen is gebruik gemaakt van de plot van Figuur 2.4 (onder of boven de experimenteel gevonden stippellijn met vergelijking...
 
$$0,43 * \log(qc) < 0,29 * 0,43 * \log(rf) + 0,27$$
 ...in combinatie met hetzelfde diepte-criterium als gebruikt voor de boringen.
- 3) Een selectie van de 'Rijswijk'-sonderingen is handmatig geïnterpreteerd op 'diepte top Pleistoceen zand' en toegevoegd aan bovenstaande twee datasets

De aldus verkregen dataset (1825 punten) is met DSI (Discrete Smooth Interpolator, Mallet 2002) geïnterpoleerd tot een vlak 'top pleistoceen zand'.

## 2.6 Interpolatie lithologie

Het centrale deklaagmodel omvat alle holocene afzettingen (Formaties van Naaldwijk, Nieuwkoop en Echteld), plus de pleistocene kleilaag ('laag van Wijchen') bovenop het ondiepste pleistocene zand (Formatie van Kreftenheye). Het model is gemaakt door alle basisgegevens litho-stratigrafisch te interpreteren, de diepteligging van de onderkant van het deklaagmodel in alle boringen en sonderingen te bepalen, en een sequentiële indicatorsimulatie (Deutsch en Journel) uit te voeren op het 3D grid.

Zoals zichtbaar in Figuur 2.6, wordt het model gevormd door subhorizontale lagen die in diepteligging sterk kunnen variëren. Wanneer boringen en sonderingen geïnterpoleerd worden zonder hiermee rekening te houden, ontstaat een discontinue laag (Figuur 2.7, bovenste deel), waar de continue laag de 'waarheid' is (onderste deel).



Figuur 2.7: Resultaat van lithologische interpolatie van een in diepte variërende laag op basis van drie boringen in een regelmatig grid zonder transformatie vooraf (boven), en met transformatie (onder).

Dit is inherent aan het gebruik van een variogram met constante anisotropie (i.e., de zoekrichtingen variëren niet ruimtelijk). Immers, om de linker groene laag door interpolatie aan de middelste te verbinden is de zoekrichting volgens de (doorgetrokken) pijl. Voor de middelste naar de rechter groene laag, is de zoekrichting volgens de (gestippelde) pijl. Daarom is de volgende procedure gehanteerd ('Discretization and flattening', Geovariances, [www.geovariances.fr](http://www.geovariances.fr)):

- van ieder van de 5 onderscheiden lagen (Tabel 2.2) is de boven- en onderkant bepaald in alle relevante boringen en sonderingen. Hieruit is een boven- en onderkant van ieder van deze lagen geïnterpoleerd met DSI;
- Het modelgrid (en bijbehorende boringen) zijn, per laag, op een zodanige manier getransformeerd dat boven- en onderkant recht worden;
- Op het getransformeerde grid is een sequential indicator simulatie gedraaid;
- De gesimuleerde lithologieën zijn weer terug getransformeerd naar het oorspronkelijke modelgrid.

De uitvoer van het model bestaat uit voor iedere gridcel een schatting van de aanwezige lithologieën (percentage).

#### 2.6.1 Bepaling cumulatieve C- en K-waarden

Deze informatie is omgezet naar modelparameterswaarden (c en KD) volgens de procedure die beschreven is in hoofdstuk 1 'Regionaal deklaagmodel'.



## 3 Geo(hydro)logisch ondergrondmodel – pleistoceen

### 3.1 Achtergrond

Dit hoofdstuk geeft een overzicht hoe het 3D ondergrondmodel is ontwikkeld dat gebruikt is in het grondwater(kwaliteits)model en het geotechnische model. De volgende zaken worden behandeld:

- de gebruikte bronbestanden voor het ondergrondmodel (3.2);
- de algemene opzet van het grondwatermodel (3.3);
- de laagindeling en parameterisatie (bepaling verticale weerstand en horizontale doorlatendheid) van de Holocene deklaag (3.5);
- de laagindeling en de parameterisatie van de Pleistocene afzettingen (3.6);
- nabewerkingen op de parameterwaardes (3.6.3);
- de resultaten; het lagenmodel met de parameterwaardes (3.7).

### 3.2 Bronbestanden

Als basis voor de ondergrond van het grondwatermodel is versie 2 van het Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem van TNO gebruikt (REGIS vII, hierna REGIS genoemd). Voor de Holocene deklaag is gebruik gemaakt van een speciaal voor dit project uitgevoerde deklaag kartering (zie hoofdstukken 1 en 2). De gridcelgrootte van REGIS (100x100 m) is aangehouden in de modellering. Het ondergrondmodel is ontwikkeld voor een gebied van 51x51 km (RD-x-coördinaten: 58.000-109.000 en RD-y-coördinaten: 423.000-474.000). Het gebied waarvoor een ondergrondmodel is gemaakt beslaat dus ook de Noordzee.

### 3.3 Algemene opzet ondergrondmodel

De ondergrond is voor het model onderverdeeld in watervoerende pakketten (WVP), slecht doorlatende lagen (SDL) en complexe lagen (zowel watervoerend als slecht doorlatend). De ondergrond is onderverdeeld in relatief veel lagen (24) zodat de oorspronkelijke data (REGIS) zoveel mogelijk behouden blijven. Voor iedere modellaag is een doorlatendheid (KD) en een verticale weerstand (c) berekend. Dit is uitgebreider dan de aanpak van eerdere door TNO ontwikkelde grondwaterkwaliteitsmodellen (bijvoorbeeld model MIPWA voor Noord Nederland) waarbij het totale aantal modellagen meestal minder dan 10 is en waarbij voor SDL alleen een c en voor WVP alleen een KD is bepaald. De uitgebreidere aanpak is gekozen, omdat er dan relatief weinig aanpassingen nodig zijn om het ondergrondmodel voor waterstroming ook te gebruiken voor stoftransport (zie deel III). De consequentie is wel dat de rekentijd van het model toeneemt (meer modelinvoer) en dat de ijking complexer wordt (meer variabelen).

Tabel 3.1: Ondergrondschematisatie voor het grondwatermodel

Ondergrond	Per laag C en Kd (DSM Model)
Holocene deklaag zand & klei	KD1
	C1
	KD2
	C2
	KD3
	C3
	KD4
	C4
	KD5
	C5
WVP2	KD6
	C6
SDL2	KD7
	C7
WVP3	KD8
	C8
SDL3	KD9
	C9
etc..	etc..
WVPx	KD24
	C24
GHB	GHB

WVP: Water Voerend Pakket

SDL: Slecht Doorlatende Laag

C: Vertikale Weerstand ( $=1/V_c$ )

KD: Horizontale Doorlatendheid

### 3.4 Uitwerking ondergrondmodel

De schematisatie voor het grondwatermodel bestaat uit 24 lagen; 11 watervoerende pakketten (WVP), 10 slecht doorlatende lagen (SDL) en 3 complexe lagen. Bij de aanpak van de ondergrondschematisatie is een onderscheid gemaakt tussen het Holoceen en het Pleistoceen. In de afzettingen uit het Holoceen zijn meer lagen onderscheiden dan in het Pleistoceen, dit heeft te maken met de interesse in het ondiepe traject vanuit de onderzoeksvragen (zoals effecten op grondwaterstand en wateroverlast aan maaiveld) en de hogere data beschikbaarheid in dit traject. Alle modellen en een korte omschrijving staan in Tabel 3.2

Tabel 3.2: Modellagen van het grondwatermodel met korte omschrijving

Laag	Type laag	Omschrijving en opmerkingen (dominante kleilaag in vet gedrukte letters)
1	WVP	Holoceen: alles boven Hollandveen (Laagpakket van Walcheren); duinen, opgebracht materiaal, enkele kleilaagjes
2	SDL	Holoceen: <b>Hollandveen</b> en dunne lokale kleilagen (laagpakketten van Wormer, Walcheren, Echteld)
3	complex	Holoceen: mariene kleien (Wormer, oosten), in westen dikke kustzanden (laagpakket van Zandvoort)
4	complex	Holoceen: Echteld/Naaldwijk afzettingen, vooral kleiige tot zandige oude Rijn en Maas afzettingen, dun in het westen
5	SDL	Holoceen: <b>basisveen</b> en rest materiaal
6	WVP	Begin Pleistoceen: nauwelijks aanwezig in gebied omdat laag 7 (klei van Wijchen) lastig is te onderscheiden van laag 6 (basisveen)
7	SDL	Boxtel klei 1, <b>Wijchen klei</b> en Kreftenheye klei
8	WVP	
9	SDL	<b>Kreftenheye klei 1</b> , Urk klei 1 en Urk klei 2
10	WVP	
11	SDL	Urk klei 1, Urk klei 2, <b>Sterksel klei 1</b>
12	WVP	
13	SDL	Sterksel klei 1, <b>Stramproy klei 1</b> , Waalre klei 1
14	WVP	
15	SDL	Kreftenheye klei 1, Urk klei 2, Stramproy klei 1, <b>Waalre klei 1</b> , Waalre klei 2
16	WVP	
17	SDL	Kreftenheye klei 1, Waalre klei 1, <b>Waalre klei 2</b>
18	WVP	
19	SDL	<b>Waalre klei 3</b>
20	WVP	
21	SDL	<b>Waalre klei 3</b> , Waalre klei 4
22	WVP	
23	complex	Waalre klei 3, <b>Maassluis Complex</b>
24	WVP	zanden van Maassluis
	GHB	<b>top Oosterhout Formatie</b> (geologisch lagenmodel)

WVP: Water Voerend Pakket

SDL: Slecht Doorlatend Laag

Complex: zowel SDL als WVP

### 3.5 Laagindeling en parameterisatie Holocene deklaag

#### 3.5.1 Laagindeling Holoceen

Een uitgebreide beschrijving van het maken van een lagenmodel van de Holocene deklaag wordt beschreven in hoofdstukken 1 en 2. Hieronder volgt een korte samenvatting. REGIS beschouwt het Holoceen als één enkele laag en heeft geen parameters (c en KD) voor deze complexe eenheid geschat. Daarom is voor dit project het Holoceen in meer detail in kaart gebracht. Hierbij moet een onderscheid worden gemaakt tussen een kerngebied van 7x7 km (x-RD-coördinaten: 80.000-87.000 en y-RD-coördinaten: 445.000-452.000) en het gebied er omheen. Het Holoceen is in eerste instantie onderverdeeld in gridcellen (25x25x0,25 m voor het kerngebied en

100x100x0,5 m voor de rest van het gebied). Met behulp van alle beschikbare boringen met een goede lithologische beschrijving en voor het kerngebied ook sonderingen is met behulp van een 3D interpolatie methode (krigging) voor iedere cel de lithologische samenstelling geschat (percentages zand (fijn, midden, grof) - zandige klei - klei - veen). Het Holoceen is onderverdeeld in vijf lagen op basis van visueel waargenomen lithologieverschillen binnen het kerngebied. Deze lagen zijn, zo goed mogelijk, doorgetrokken naar het gebied buiten de kern. Het onderscheid in vijf lagen in het buitengebied is lastiger omdat de informatie dichtheid hier lager is. De lagen in het Holoceen zijn dus niet strikt genomen voornamelijk watervoerend of slecht doorlatend.

Het basisveen (modellaag 5, onderkant Holoceen, niet geparametriseerd in REGIS) is alleen in heel goed beschreven boringen te onderscheiden van de Wijchen klei (Pleistoceen, geparametriseerde binnen REGIS). Omdat goede boringen schaars zijn en het onderscheid een zeer tijdrovende zaak is, is voor een pragmatische aanpak gekozen om een onderscheid te maken tussen deze twee eenheden. In het kerngebied wordt de onderste Holocene SDL, wanneer de dikte 0,5 m of minder is, basisveen. Alle diktes meer dan 0,5 m wordt als Wijchen klei genomen. De klei van Wijchen vervangt, voor het kerngebied, de eerder door REGIS gekarteerde kleilaag. De onderkant van het Holoceen is in dit gebied dus ook bijgesteld ten op zichte van REGIS.

Het basisveen buiten het kerngebied is niet goed te herleiden uit boringen (hiervoor is een uitgebreidere analyse nodig). Op basis van een voor het DGM (Digitaal Geologisch Model) gemaakte kaart is de verbreiding van het basisveen wel bekend. Daar waar de kaart in het buitengebied aangeeft dat er basisveen zit is de dikte op 0,5 m dik gesteld. Een kanttekening is wel dat kleine insnijdingen in het basisveen in het buitengebied niet zijn gekarteerd.

### 3.5.2 *Parameterisatie Holoceen*

In het kader van het project REGIS Zeeland en het project TOPINTEGRAAL zijn inventarisaties uitgevoerd van bestaande hydraulische metingen aan ongestoorde kernen. Op basis van deze metingen zijn in afwachting van aanvullende metingen, waar mogelijk, per lithostratigrafische eenheid en per lithoklasse (klei, zandige klei, fijn zand, middel fijn zand, grof zand – grind en veen) voorlopige bandbreedten voor de doorlatendheid afgeleid. In het algemeen kan gesteld worden dat de meeste metingen betrekking hebben op de verticale doorlatendheid van de fijnzandige en kleiige sedimenten. Daar waar geen bestaande meetgegevens voorhanden waren, zijn de bandbreedten gebaseerd op gegevens uit de literatuur, of uitgaande van een veronderstelde anisotropiefactor afgeleid uit de horizontale/verticale doorlatendheid. De lithologieën van de cellen zijn met behulp van de gemiddelde waarden uit onderstaande REGIS tabel omgezet naar parameter (c en KD) waarden. De bandbreedte is ook weergegeven omdat deze van belang is voor de ijking van de modelparameters. Benadrukt dient te worden dat deze tabel een voorlopig karakter heeft; in het kader van het project TOPINTEGRAAL zal deze tabel worden aangescherpt.



Tabel 3.3 Parameterwaarden voor verschillende sedimenttypes.

Sediment	C_min	c_avg	c_max	kh_min	kh_avg	kh_max
Klei	45.66	294.12	15220.7	0.000066	0.0034	0.0219
Veen	3.13	20.41	1562.5	0.00064	0.049	0.32
Anders	0.03	0.18	1883.24	0.0007	8.1	45.1
Zandige klei	3.32	24.39	15220.7	0.000066	0.041	0.301
Zand fijn	0.27	1.54	13698.63	0.0001	0.9	5.4
Zand middel	0.03	0.18	1883.24	0.0007	8.1	45.1
Zand grof	0.03	0.06	0.14	10	24.2	50

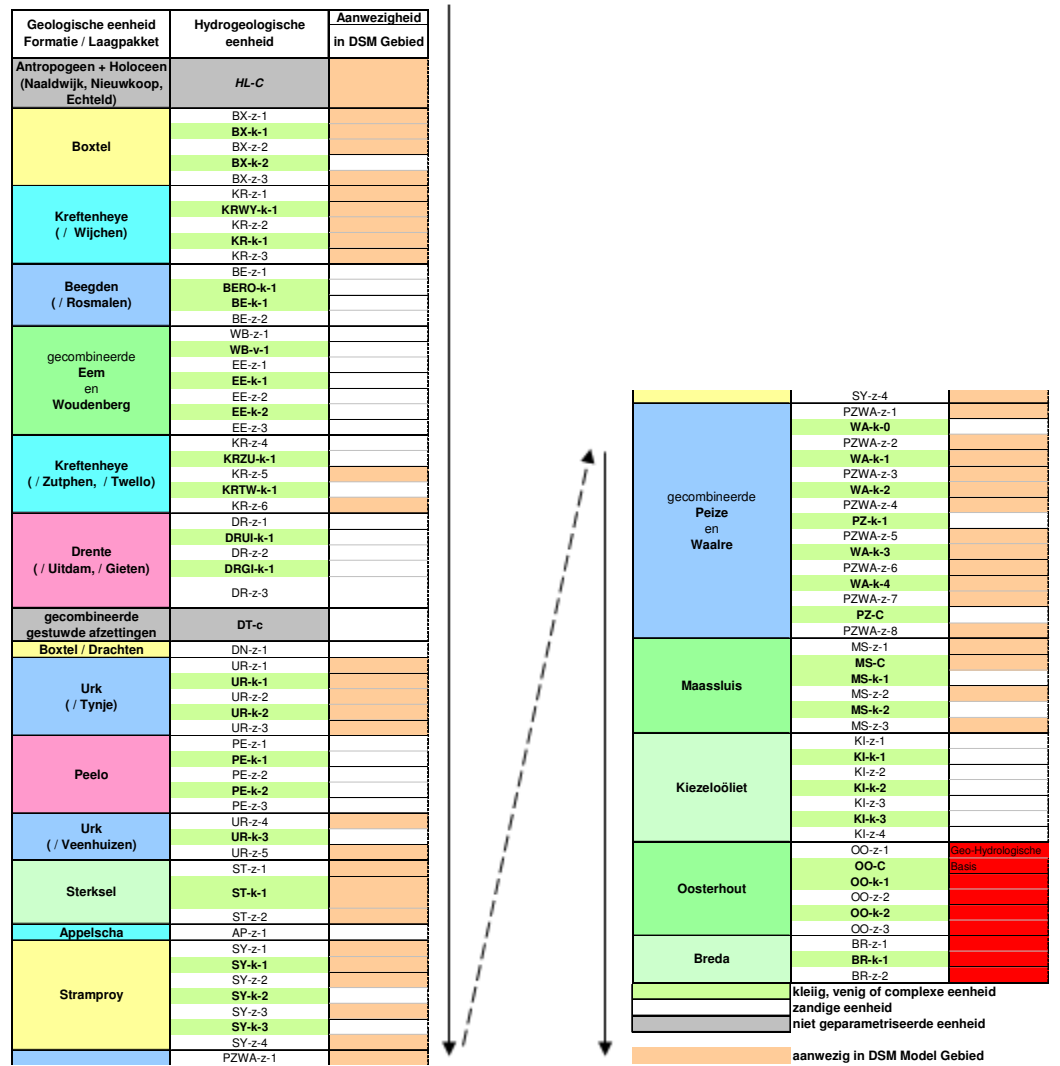
bron: REGIS. De tabel is recent maar voorlopig

### 3.6 Laagindeling en parameterisatie Pleistoceen

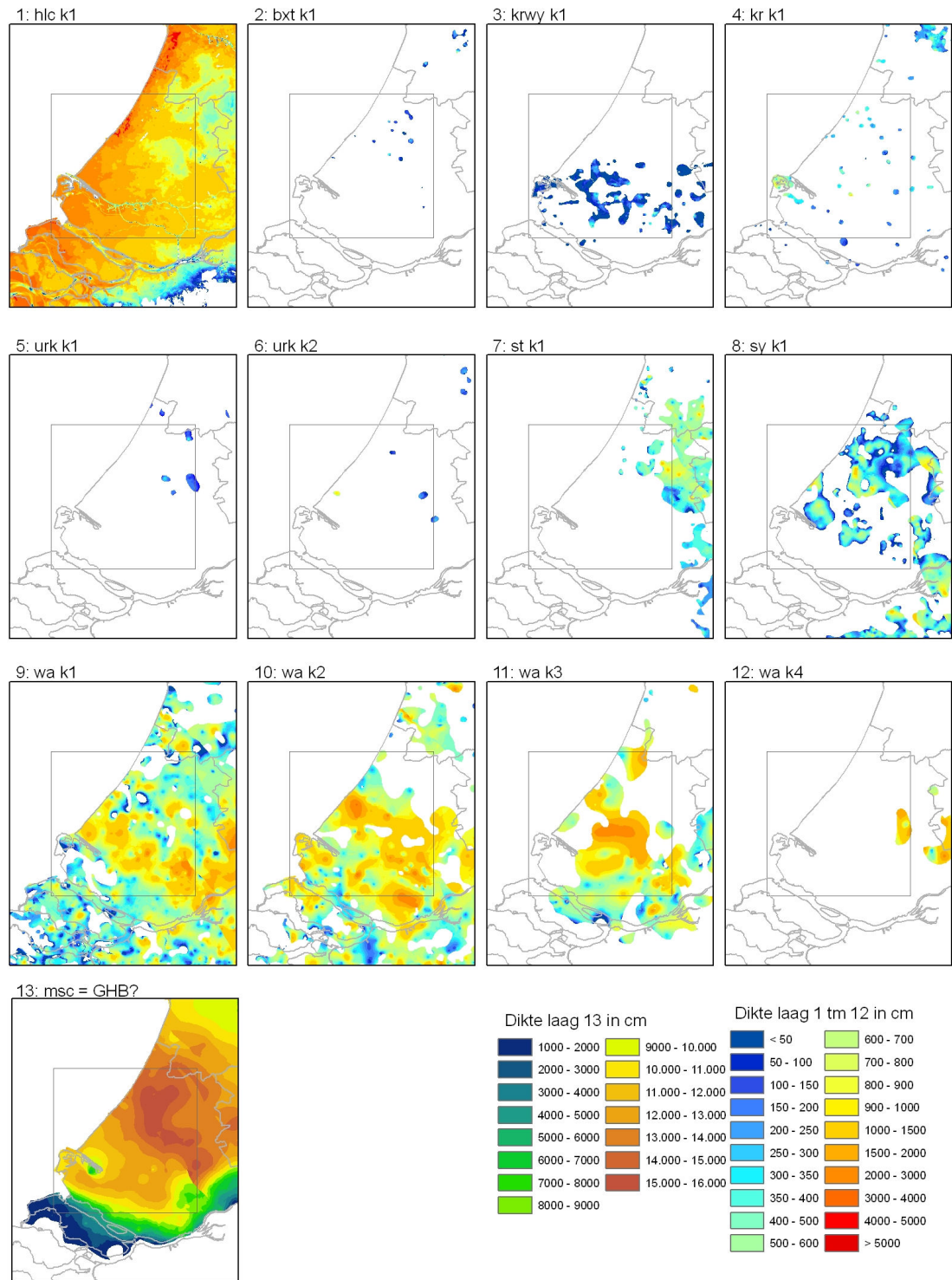
De hydrogeologische kolom (REGIS) voor het model gebied staat in Figuur 3.1. De geo-hydrologische basis is gesteld op de top van de Oosterhout Formatie (Pliocene).

#### 3.6.1 Laagindeling Pleistoceen

Als startpunt zijn alle REGIS kleilagen en complexe (klei en zand) lagen (in totaal 12, exclusief Holoceen, Figuur 3.2) verdeeld over negen slecht doorlatende lagen (SDL). Aaneengesloten kleilagen die behoren tot dezelfde REGIS kleilaag kunnen dus, afhankelijk van hun diepte ligging en de nabijheid van andere kleilagen, voor diverse regio's in verschillende modellen terecht zijn gekomen. In Tabel 3.2 staat vermeld in welke modellen de REGIS kleilagen terecht zijn gekomen. De lagen tussen de SDL zijn dus watervoerende pakketten (WVP). Voor de WVP is geen overzicht gemaakt uit welke formaties deze bestaan, zoals bij de SDL. Het uitgangspunt voor het maken van het ondergrondmodel ('de kapstok') zijn namelijk de kleilagen; alle tussenliggende formaties met zandlagen (zie Figuur 3.1) vormen de watervoerende pakketten.



Figuur 3.1: Hydrogeologische kolom voor het grondwatermodel, afgeleid uit REGIS.



Figuur 3.2: Overzicht van dikte en verbreiding alle REGIS kleilagen in het grondwatermodel.

### 3.6.2 Parameterisatie Pleistoceen

De watervoerende pakketten en scheidende lagen zijn tijdens de initiële (voor-ijking) parameterisatie voorzien van geohydrologische parameters. Iedere laag heeft een KD-

waarde ( $m^2/dag$ ) en een c-waarde (dagen) toegekend gekregen. Per modellaag zijn de parameterwaardes van de betreffende REGIS lagen overgenomen voor het deel dat ze binnen de modellaag liggen. Hierbij moet worden aangetekend dat REGIS voor zandlagen geen c of  $K_v$  (horizontale doorlatendheid in m/d) waarde en voor kleilagen geen KD of  $K_h$  beschikbaar heeft. Deze waardes zijn geschat op basis van de volgende anisotropiefactoren (gebaseerd op Linden et al., 2002):

- $K_h \text{ klei} = 3,0 \times K_v$ ;
- $K_v \text{ zand} = 0,5 \times K_h$ .

De opgetelde berekende parameterwaardes voor alle Pleistocene lagen zijn gecontroleerd door ze te vergelijken met de opgetelde parameterwaardes van de REGIS lagen die verdeeld zijn over de betreffende modellagen.

Voor niet-stationaire (tijdsafhankelijke) modelberekeningen, krijgen de watervoerende pakketten ook een bergingscoëfficiënt toegekend. Deze bergingscoëfficiënten zijn afhankelijk van de bodemsoort en grondwatersituatie en worden binnen het CAPSIM concept (onverzadigde zone modellering, bijlage XX) ingeschat op basis van standaard tabellen van Alterra.

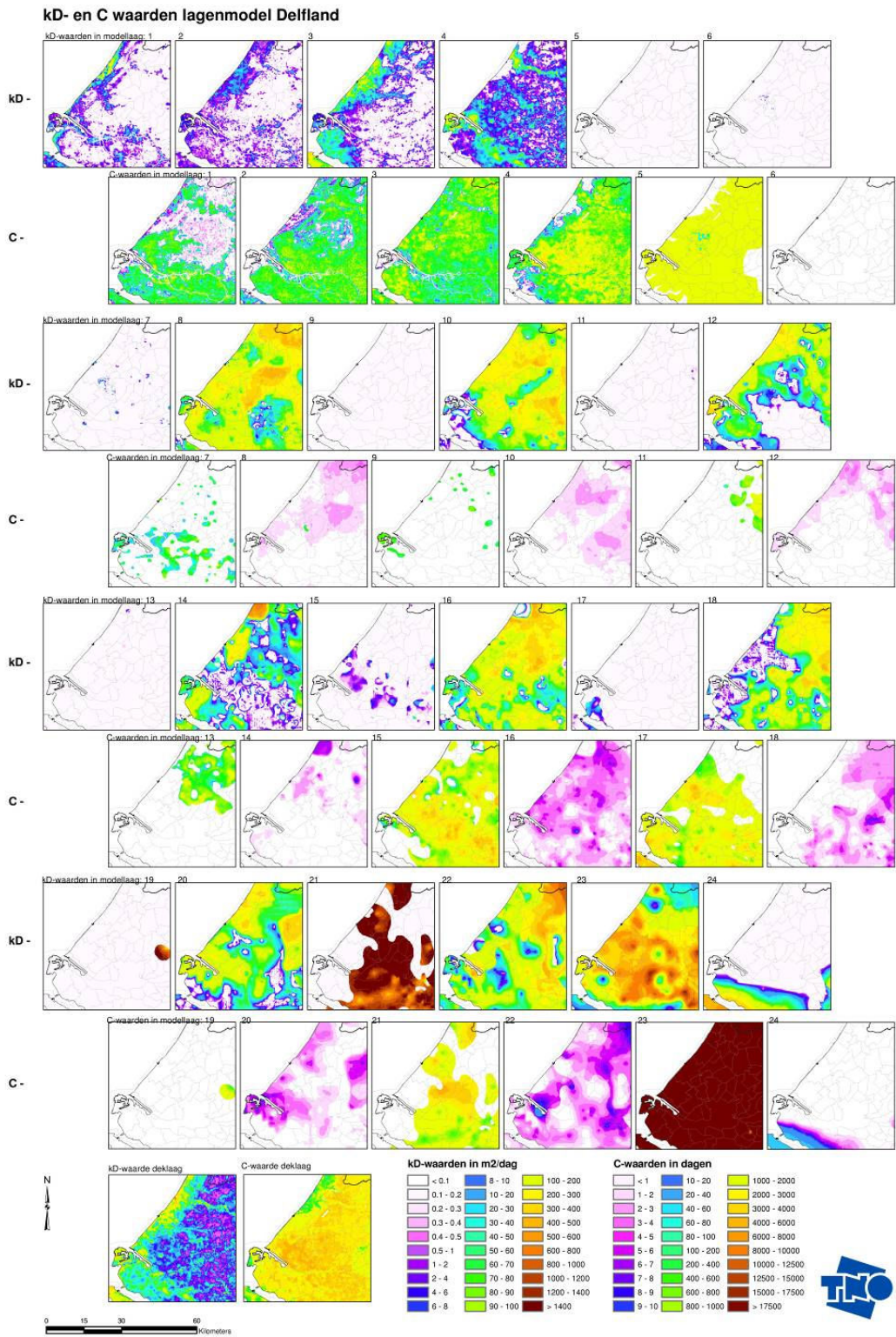
### 3.6.3 *Parameterisatie nabewerkingen*

De volgende nabewerkingen zijn uitgevoerd op de parameter waarden:

- extrapolatie naar de gebieden die buiten het REGIS karteergebied ligt (vooral de Noordzee);
- minimale KD is gesteld op  $0,1 m^2/d$ ;
- minimale c is gesteld op 0,1 dag.

## 3.7 **Resultaten**

De verticale (c) en horizontale doorlatendheid (KD) van alle lagen staan in Figuur 3.3. De totale weerstand en doorlatendheid van de deklaag (lagen 1 t/m 5) staan ook apart in de figuur weergegeven.



Figuur 3.3 Verticale en horizontale doorlatendheid van alle modellagen.

### 3.7.1 Verticale doorlatendheid (c-waarde)

Observaties met betrekking tot de c-waarde kaarten:

- Omdat, buiten het kerngebied, het basisveen bijna overal even dik gesteld is (0,5 m, zie 3.5) is de consequentie dat hij bijna overal dezelfde c-waarde heeft (laag 5).
- Zoals verwacht is de verticale weerstand (c) van watervoerende pakketten vrijwel nihil.

De totale c-waarde voor de deklaag is ongeveer twee keer lager dan in het IWACO model (vergelijk Figuur 3.3 en Figuur 3.4). Dit is ook het geval als laag 7 (Pleistocene klei van Wijchen) bij de Holocene deklaag wordt geteld. Opmerkingen hierover:

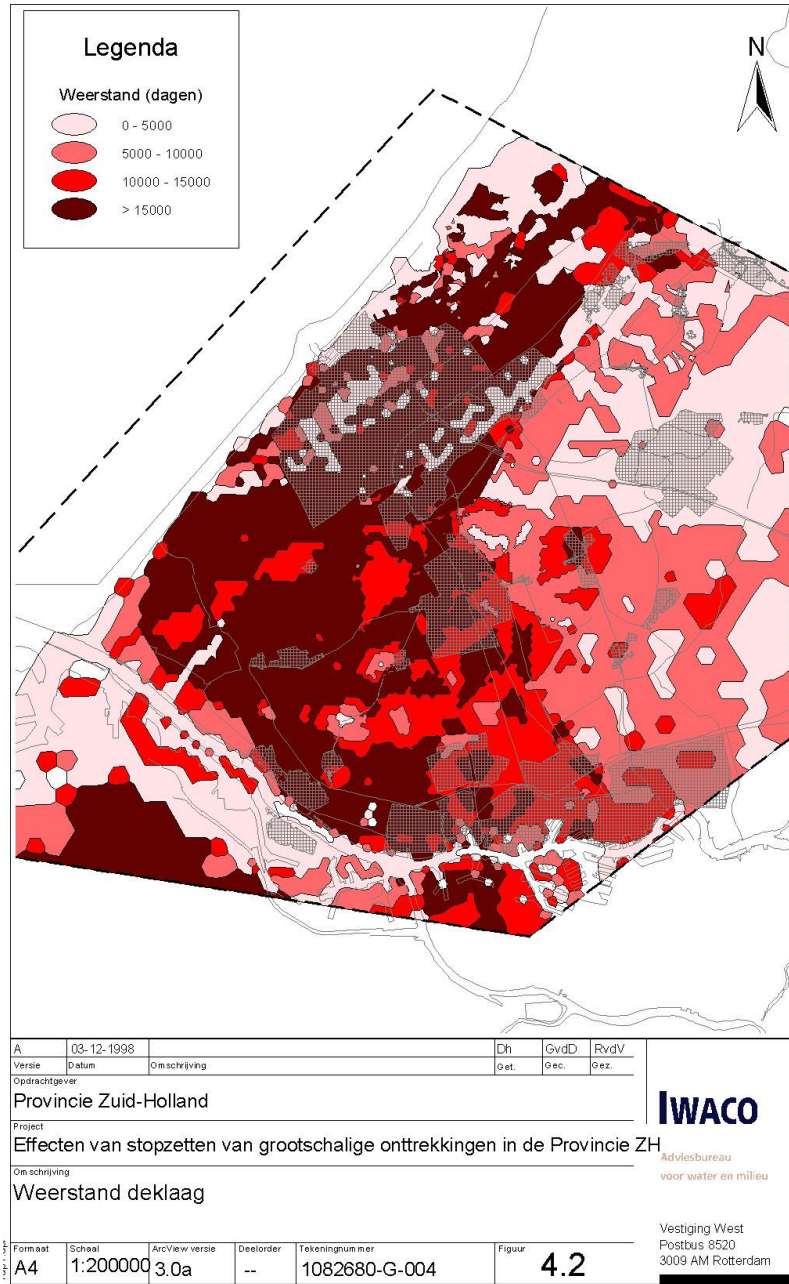
- Een rekenfout is zeer onwaarschijnlijk omdat: a) in Zeeland is c-waarde ook gebaseerd op Tabel 3.3 en hier pakte dit over het algemeen ook lager uit dan in de meeste bekende modellen, b) TopIntegraal, een lopende TNO project voor de kartering van de Holocene deklaag, levert vergelijkbare c-waardes op;
- Bovenstaande tabel (Tabel 3.3) is gebaseerd op een beperkte hoeveelheid data en nog niet af (bijvoorbeeld eigenschappen basisveen is gebaseerd op informatie uit Zeeland);
- IWACO geeft aan in het rapport dat de parameterisatie van de deklaag ook gebaseerd is op weinig gegevens.

De conclusie is dat als een hogere c-waarde voor de toplaag gewenst is er een c-waarde gebruikt moeten worden die hoger is dan de gemiddelde waarde aangegeven in Tabel 3.3. Vooralsnog is besloten om af te wachten wat de ijking gaat doen (wordt c-waarde van de deklaag verhoogd om geobserveerde stijghoogteverschillen tussen deklaag en onderliggende lagen te bereiken?).

### 3.7.2 Horizontale doorlatendheid (KD-waarde)

Observaties met betrekking tot de KD-waarde kaarten:

- Laag 6 heeft een lage KD omdat er tussen de laag 5 (Holoceen basis veen) en laag 7 (Pleistoceen, Wijchen klei) geen zandlaag is gekarteerd. Lagen 5, 6 en 7 zouden eventueel samengevoegd kunnen worden. Echter, omdat dit consequenties heeft voor andere verrichte werkzaamheden (onder andere de onttrekkingen) en omdat het geen invloed heeft op de modelberekening is besloten de laag in het model te laten;
- Zoals verwacht is de horizontale doorlatendheid (KD) van de meeste slecht doorlatende lagen vrijwel nihil.



Figuur 3.4: Weerstand van de deklaag volgens het IWACO model (IWACO, 1999)

## 4 Referenties

- Deutsch, C.V. en Journel, A.G. (1997). *GSLIB Geostatistical software library and user's guide*. 2nd edition, Oxford University Press, New York, 384p.
- Gemeente Delft (2002). *Geo-archeologische kaart van de Gemeente Delft*.
- IWACO (1999). *Effecten van stopzetten grootschaalige onttrekkingen in de provincie Zuid-Holland*. Provincie Zuid-Holland.
- Linden, W., AhM. Kremers en H.J.T. Weerts (2002). *Landsdekkende karakterisatie topsysteem*. TNO-rapport: NIRG 02-112-B.
- Mallet, J.L. (2002). *Geomodeling*. Oxford University Press, New York, 2002, 599p.
- TNO-NITG (1996). *Geologische kaart van Nederland 1:50,000, blad Rotterdam Oost (370)*.



# Deel II – Kwantiteitsmodel Grondwater



# 1 Kwantiteitsmodel Grondwater – algemeen

## 1.1 Inleiding

In Deel II van het Technische Rapport wordt in detail ingegaan op de totstandkoming van het grondwatermodel. Het grondwatermodel wordt doorgerekend met MODFLOW gekoppeld met een onverzadigde zone model (CAPSIM). Er is een snelle versie ontwikkeld van deze MODFLOW-CAPSIM combinatie met de mogelijkheid om het model eenvoudig op te schalen naar een grovere schaal of een deelmodel uit te knippen. Hierdoor kan het grondwatermodel gebruikt worden voor zowel lokale detailstudies als regionale studies.

Het merendeel van de hoofdstukken gaan in op de opbouw van de verschillende Modflow modules die zijn gebruikt. Andere hoofdstukken beschrijven onder andere de noodzakelijke bepaling van een juist maaiveld als ook het proces van ijking.

## 1.2 Toelichting op nieuwe modelschil iMOD

iMOD, of Interactive MODELing, is een gebruiksvriendelijke 'schil' om een grondwatermodel gebaseerd op MODFLOW (Harbaugh en McDonald, 1988) en fungeert als toegang tot de grondwatermodel referentie-database en de snelle model- en scenariogenerator. iMOD kan zowel lokaal als op een internetserver draaien en kent geen streng licentiesysteem. Daarmee is iMOD een flexibel communicatiemiddel dat zowel binnen als buiten de eigen organisaties gebruikt kan worden voor de analyse van grondwatersystemen ter ondersteuning van beleidsprocessen.

Naast grondwatermodelfunctionaliteiten, zoals het maken van modelruns en de analyse van invoer en uitvoer, heeft *iMOD* ook snelle grafische functies voor het visualiseren van kaarten, profielen en grafieken. Daarnaast heeft *iMOD* beperkte GIS functionaliteiten ter ondersteuning van de grondwatermodellering. Er is bewust gekozen om deze GIS functionaliteiten beperkt te houden. Voor GIS functionaliteiten zijn goede bestaande pakketten beschikbaar en daarom wordt juist de interactie tussen *iMOD* en deze GIS-pakketten zo goed mogelijk gefaciliteerd.

### 1.2.1 *iMOD* historie

iMOD is ontwikkeld in het kader van het MIPWA 2 project (Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer) in opdracht van de belangrijkste waterbeheerpartijen in het Noord-Nederland. In dit project is een grondwatermodeldatabase en Impuls Respons (IR) database opgesteld ten behoeve van de ondersteuning van het vaststellen van GGOR (TNO et al., 2007).

Ook andere waterpartijen in Nederland gebruiken iMOD. Functionaliteit welke op dit moment gereed zijn of in ontwikkeling voor andere partijen:

- IR-database analyse
  - Effecten van maatregelen opvragen en vergelijken,
  - Effecten van scenario's (combinaties van maatregelen) opvragen en vergelijken.

- RO-database:  
Door vertaling IR resultaten naar Ruimtelijke Ordeningstermen (RO): effecten op landbouw en natuur (waternoodsystematiek) en effecten op stedelijk gebied.
- Stroombaananalyse:  
Berekenen van stroombanen, zowel stationair als niet-stationair;

### 1.2.2 Grondwatermodel referentie-database

De grondwatermodel referentie-database bevat in feite alle modelparameters zoals deze ook in een 'normaal' modflowmodel beschikbaar zijn. Verschil is dat deze informatie niet verplicht op gelijke (model)schaal opgeslagen hoeft te worden. Zo kan de parameterisatie van de (diepe) ondergrond op 100x100m resolutie worden beheerd terwijl het topsysteem op een resolutie van 25x25 is aangemaakt.

Uit de grondwatermodel referentie-database kan vervolgens een gedetailleerd lokaal deelmodel van willekeurige omvang op een willekeurige locatie worden gegenereerd. De parameterisatie van de deelmodellen kan in iMOD indien gewenst vervolgens nog worden aangepast, waarmee verschillende versies van de deelmodellen kunnen worden gecreëerd.

De grondwatermodel referentie-database is gevuld met modelinvoer- en modeluitvoerbestanden in iMOD-formaat. Het iMOD-formaat is speciaal ontwikkeld voor grootschalige gedetailleerde grondwatermodellen en bestaat uit:

- rasters als IDF (Indexed Data File);
- puntlocaties als IPF (Indexed Point File);
- tijdreeksen als TXT (standaard text-formaat);
- lijnen en polygonen als IVF (Indexed Vector File).

De modelinvoer wordt vastgelegd in IDF-, IPF- en TXT-bestanden, waarbij de TXT-bestanden zijn gekoppeld aan de locaties in de IPF-bestanden. De modeluitvoer wordt vastgelegd in IDF-bestanden. De IVF-bestanden worden gebruikt als achtergrond bij het raadplegen.

### 1.2.3 Een meer gedetailleerde lijst van functionaliteit

De interactieve toepassingsomgeving iMOD is ontwikkeld door TNO/Deltares en is geschikt voor:

- het raadplegen van de model referentie-database (modelinvoer en modeluitvoer);
- het genereren van scenario-modellen uit de referentie-database;
- gemakkelijke analyse van de diverse modellen met behulp van uitgebreide mogelijkheden voor het maken van dwarsdoorsnedes;
- postprocessing tools:
  - GxG kaarten aanmaken;
  - Waterbalansen maken;
  - Tijdreeksen aanmaken;
  - Stroombanen berekenen;
  - RO bevragingen (volgens HELP2005);
- eenvoudige raster bewerkingen (mathematische bewerkingen (+, -, \* en /) direct op IDF's);
- Metadata bijhouden;
- opvragen waarden van meerdere modellen tegelijk met behulp van interactieve onderdelen;

- conversie van en naar ESRI compatible formaten (ASII naar IDF en v.v. en shape naar gen (ArcINFO generate files) en v.v..

Hiernaast zijn nog de volgende, meer algemene, functies beschikbaar:

- in-/uitzoomen;
- weergave van topografische kaarten en andere achtergronden;
- bewaren en aanpassen van projectinformatie;
- online help;
- plot functionaliteit (naar plotter, maar ook naar uitvoer formaten als jpg, eps en bmp).

### 1.3 Gebruiksmogelijkheden modelschil iMOD

Voor het doorrekenen van het volledige grondwatermodel zijn ook nog verschillende mogelijkheden door variaties in:

- Tijd: stationair en niet-stationair voor de gehele periode of gedeelten;
- Ruimte: grove resolutie of fijne resolutie, voor het gehele gebied of een detail.

Het doorrekenen van maatregelen met het stationaire model, levert gemiddelde effecten op het systeem. De reketijden zijn aanzienlijk korter dan voor het niet-stationaire model, maar je kunt hiermee niets zeggen over bijvoorbeeld de GHG en GLG (gemiddeld hoogste/laagste grondwaterstand) of andere temporele variabele uitvoer. Wanneer GHG/GLG of andere temporele uitvoer juist wel gewenst is, dient gerekend te worden met een niet-stationair model van minimaal 8 jaar, maar liefst de volledige modelperiode.

iMOD kent handige tools om het model op te schalen naar grovere resoluties. Hoe grover de resolutie des te sneller het model reket. Het doorrekenen van een deelgebied gaat natuurlijk altijd sneller dan het volledige modelgebied, maar kent risico's: mogelijk heeft de gekozen modelrand effect op de modelberekening. De iMOD model tool adviseert altijd een bufferzone (=afstand interessegebied tot modelrand van het deelgebied) van minimaal 1500 m, echter voor het doorrekenen van ingrijpende maatregelen is een grotere bufferzone aan te raden. De gebruiker dient altijd te checken of de effecten niet toch de rand van het deelmodel hebben bereikt. In Tabel 1.1 staan de indicatieve reketijden van de verschillende (deel)modellen weergegeven.

Tabel 1.1: Indicatieve reketijden voor de verschillende (deel)modellen

	<i>stationair</i>	<i>niet-stationair</i>
<i>250 m schaal</i>	15 minuten	11 – 16 uur
<i>25 m schaal</i>	15 – 20 minuten per deelmodel bij 5x5=25 deelmodellen voor het hele modelgebied	15 - 33 uur per deelmodel bij 4x4=16 deelmodellen voor Delfland



## 2 Modelranden en randvoorwaarden

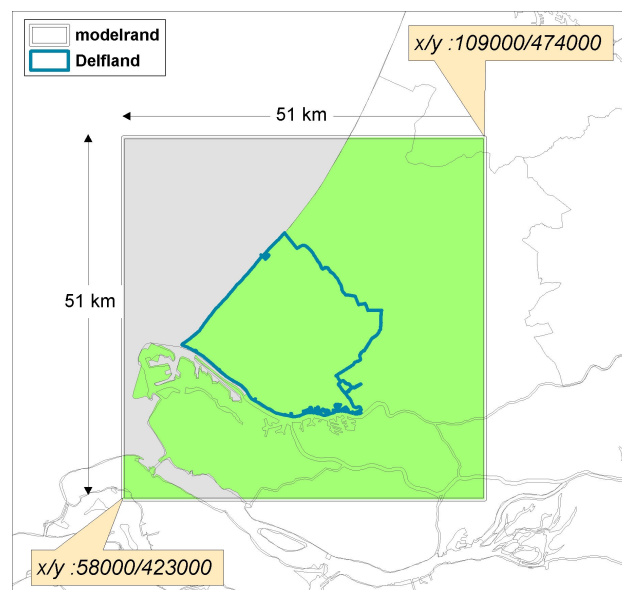
### *Modelranden*

De ligging en omvang van het modelgebied is zodanig gekozen, dat effectberekeningen (grondwaterwinning uitzetten) niet waarneembaar worden beïnvloed door de randen van het model. De ligging van deze modelranden zijn op basis van effectberekeningen met het reeds ontwikkelde PZH grondwatermodel bepaald. Op basis van die analyse zijn de volgende modelgrenzen gekozen:

$x_{\text{minimum}} = 58.000$  en  $x_{\text{maximum}} = 109.000$

$y_{\text{minimum}} = 423.000$  en  $y_{\text{maximum}} = 474.000$

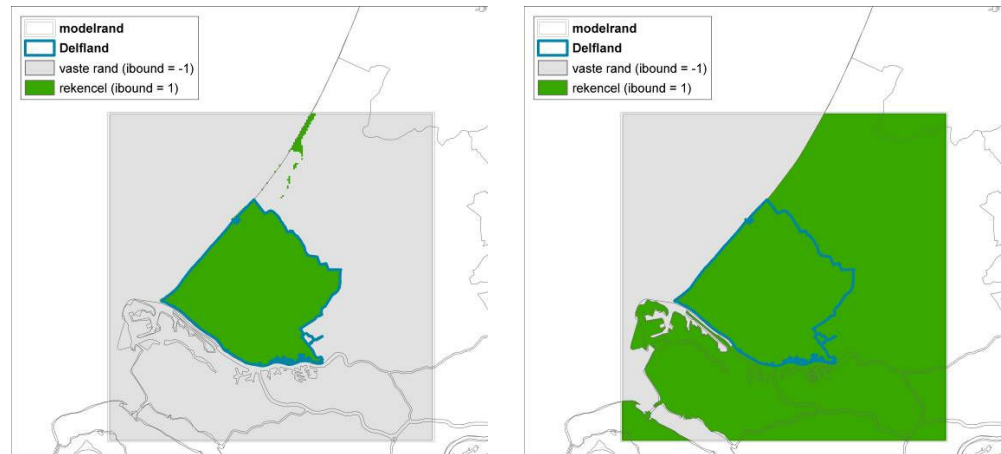
Het modelnetwerk heeft daarmee een omvang van 51x51 km en kent een gedetailleerde resolutie met cellen van 25x25 meter (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1: Omvang en ligging modelgebied

### *Randvoorwaarden*

Buiten de grenzen van waterschap Delfland is gekozen voor een vaste stijghoogterand voor modellaag 1. Deze stijghoogten, overeenkomende met de gemiddelde polderpeilen, zijn overgenomen uit het PZH model. Voor laag 1 geldt dan ook dat buiten Delfland geen waterlopen, drains en grondwateraanvulling worden gemodelleerd. Het grijze gebied in Figuur 2.2a geeft het gebied aan met een vaste stijghoogte in laag 1.



Figuur 2.2: Ligging modelranden voor (a) de deklaag en (b) de overige lagen

Voor de overige lagen, laag 2 t/m 24 heeft het model een vaste stijghoogte op de randen. Dus ook de oost- en zuidrand van het model hebben exact één modelcel waarvoor een vaste stijghoogte geldt die is overgenomen uit het PZH model. In Figuur 2.2 is die dunne rand weggefallen maar wel aanwezig. In het westen heeft de Noordzee een vaste stijghoogte.



## 3 Onttrekkingen

### 3.1 Inleiding

Deze paragraaf beschrijft de uitgangspunten voor de implementatie van de grondwateronttrekkingen in het grondwatermodel. Informatie over grondwateronttrekkingen is verkregen van de provincie Zuid-Holland die de gegevens beheert in het kader van het verlenen van de vergunningen. Meer gedifferentieerde gegevens over de grondwaterwinning zoals de exacte locaties van de afzonderlijke pompputten en onttrekkingsdebiets zijn verkregen via de provincie Zuid-Holland en de gemeente Delft.

### 3.2 Verwerking onttrekkingen in grondwater model

Informatie over de onttrekkingen zijn opgevraagd voor de periode waarover het grondwatermodel rekent, namelijk 1 januari 1994 - 31 december 2004. Per jaar bevatten deze databestanden de volgende relevante informatie voor het grondwater model:

- identificatienummer van onttrekking;
- locatie onttrekking (x- en y-coördinaat);
- grootte vergunde onttrekking ( $m^3/jaar$ );
- pakketcode die de positie van het filter aangeeft.

De pakketcode geeft aan in welke geologische formatie de onttrekking aangrijpt. Met behulp van geologen van TNO zijn de geologische formatie toegekend aan de laag of de lagen van het ontwikkelde grondwatermodel.

Voor het stationaire grondwatermodel dat de gemiddelde grondwaterstand over de periode 1994-2004 simuleert, is de gemiddelde vergunde onttrekkinghoeveelheid berekend over deze 11 jarige periode. Voor het niet stationaire model (1994-2004) is voor elk kwartaal de onttrekkingshoeveelheid ( $m^3/kwartaal$ ) bepaald.

Met behulp van een transformatie programma zijn de invoerfiles met onttrekkingen voor het grondwatermodel gemaakt. De volgende voorwaarden zijn opgenomen in dit programma.

#### 3.2.1 Kleine onttrekkingen

*Alle onttrekkingen groter dan  $10.000 m^3/jaar$  (circa  $1 m^3/uur$ ) worden meegenomen in het grondwatermodel.*

In het modelgebied bevinden zich een groot aantal (zeer) kleine onttrekkingen die niet tot nauwelijks van invloed zijn op de grondwaterstand en/of de grondwaterstroming. De reden waarom deze kleine onttrekkingen niet in het model worden meegenomen is dat gegevens van kleine onttrekkingen meestal niet gedetailleerd of betrouwbaar beschikbaar zijn. Voor meldingen geldt bijvoorbeeld dat meestal niet het werkelijke debiet is geregistreerd maar het verwachte debiet. Daarnaast is van kleine onttrekkingen ook de locatie van de onttrekking niet altijd betrouwbaar bekend.

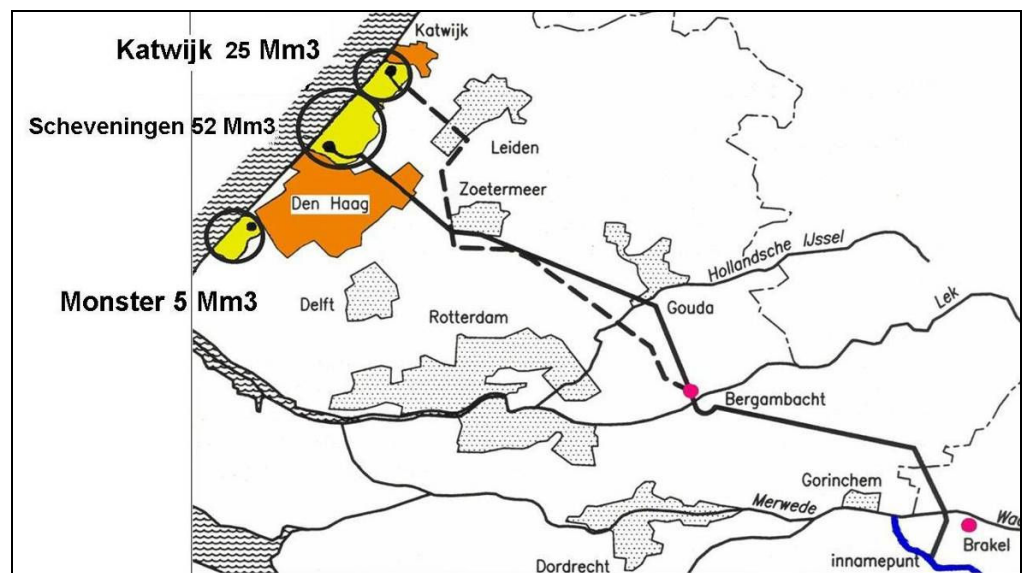
### 3.2.2 Tijdelijke onttrekkingen

Tijdelijke onttrekkingen met een omvang groter dan 10.000 m<sup>3</sup>/jaar worden meegenomen in het model.

Alle onttrekkingen groter dan 10.000 m<sup>3</sup>/jaar worden meegenomen, dus ook als een onttrekking slechts een of twee jaar actief is geweest. Wel is het zo dat de jaren dat er minder dan 10.000 m<sup>3</sup>/jaar werd onttrokken buiten beschouwing worden gelaten. Of de tijdelijke onttrekkingen ook daadwerkelijk onderdeel uitmaken van het stationaire of niet stationaire model hangt af van de modelperiode in relatie tot de onttrekkingsperiode.

### 3.2.3 Drinkwateronttrekkingen door Duinwaterbedrijf Zuid-Holland

Duinwaterbedrijf Zuid-Holland (DZH) onttrekt water in de volgende drie wingebieden: Solleveld (Monster), Meijendel (Scheveningen) en Berkheide (Katwijk). In Figuur 3.1 zijn deze wingebieden weergegeven.

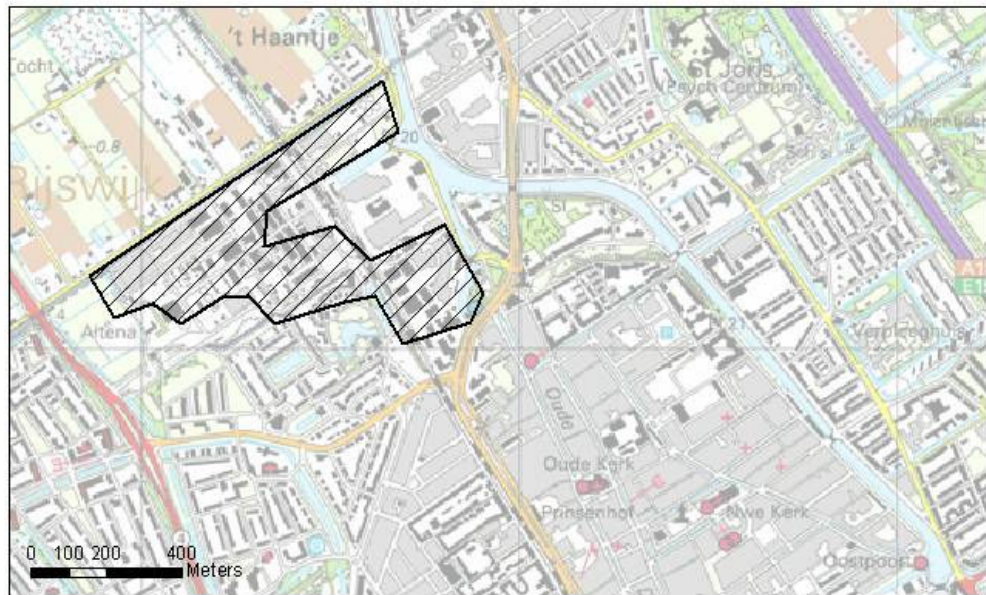


Figuur 3.1: Waterwingebieden van Duinwaterbedrijf Zuid Holland

Volgens informatie van DZH zijn deze drie wingebieden nagenoeg allemaal gesloten systemen van infiltratievijvers met daaromheen onttrekkingsputten. De omvangrijke winningen van Katwijk en Scheveningen zijn echter niet in het model opgenomen maar in overleg met DZH is het stijghoogtepatroon als vaste randvoorwaarde aan het model opgelegd. Een klein deel van de winning bij Scheveningen is niet gesloten. Deze onttrekking met een omvang van 4 Miljoen m<sup>3</sup>/jaar is daarom aan het grondwatermodel toegevoegd. Voor het gebied rond Monster is een andere inpassing gekozen. Deze winning is wel aan het model toegevoegd in combinatie met het aanbrengen van de infiltratievijvers.

## 3.3 Winning DSM terrein

Gezien het belang van de winning in de modellering is bij de invoering zoveel mogelijk detail ingebracht. Op basis van informatie die via de Provincie is verkregen is de spreiding van de verschillende bronnen over het DSM terrein bekend (zie Figuur 3.2).



Figuur 3.2: Deel van het DSM terrein waar bronnen geïnstalleerd zijn

De grondwaterwinning is uiteindelijk uitgesplitst in 34 afzonderlijke bronnen. Het totale debiet voor de stationaire situatie is vastgesteld op basis van beschikbare reeksen waarin het totale onttrekkingsregime is vastgelegd. Tabel 2.1 geeft een overzicht van deze jaargemiddelde totalen. Op basis daarvan is de grootte van de winning voor het stationaire model over die periode vastgesteld op 12,2 Miljoen  $m^3$ /jaar.

Tabel 3.1: Gemiddeld jaardebiet winning [milj.  $m^3$ /jaar]

Jaartal	Jaardebiet [Mlj $m^3$ /jaar]	Jaartal	Jaardebiet [Mlj $m^3$ /jaar]
1994	12,5	2000	11,6
1995	12,5	2001	12,2
1996	12,6	2002	12,5
1997	13,4	2003	12,5
1998	13,1	2004	11,6
1999	11,9	2005	10,1

Voor het niet-stationaire model zijn afzonderlijke debieten vastgesteld voor de winter- en zomerperiode. De variatie over de seizoenen is niet voor alle jaren bekend maar deze is geschat aan de hand van gegevens over de periode 1979 tot 1995. Daaruit blijkt dat in de winter 42% van het debiet wordt opgepompt tegen 58% in de zomer. Diezelfde verdeling is aangehouden om het onttrekkingsregime voor de niet-stationaire situatie op te stellen.

Op basis van de originele rapportage over de installatie van de verschillende bronnen blijkt dat de filters beginnen op 20 tot 25 m. beneden maaiveld en eindigen tussen 40 en 50 m. beneden maaiveld. Op basis van die informatie worden de onttrekkingen geplaatst in de lagen 10, 12 en 14 van het grondwatermodel.



## 4 Oppervlaktewatersysteem

### 4.1 Implementatie oppervlaktewater

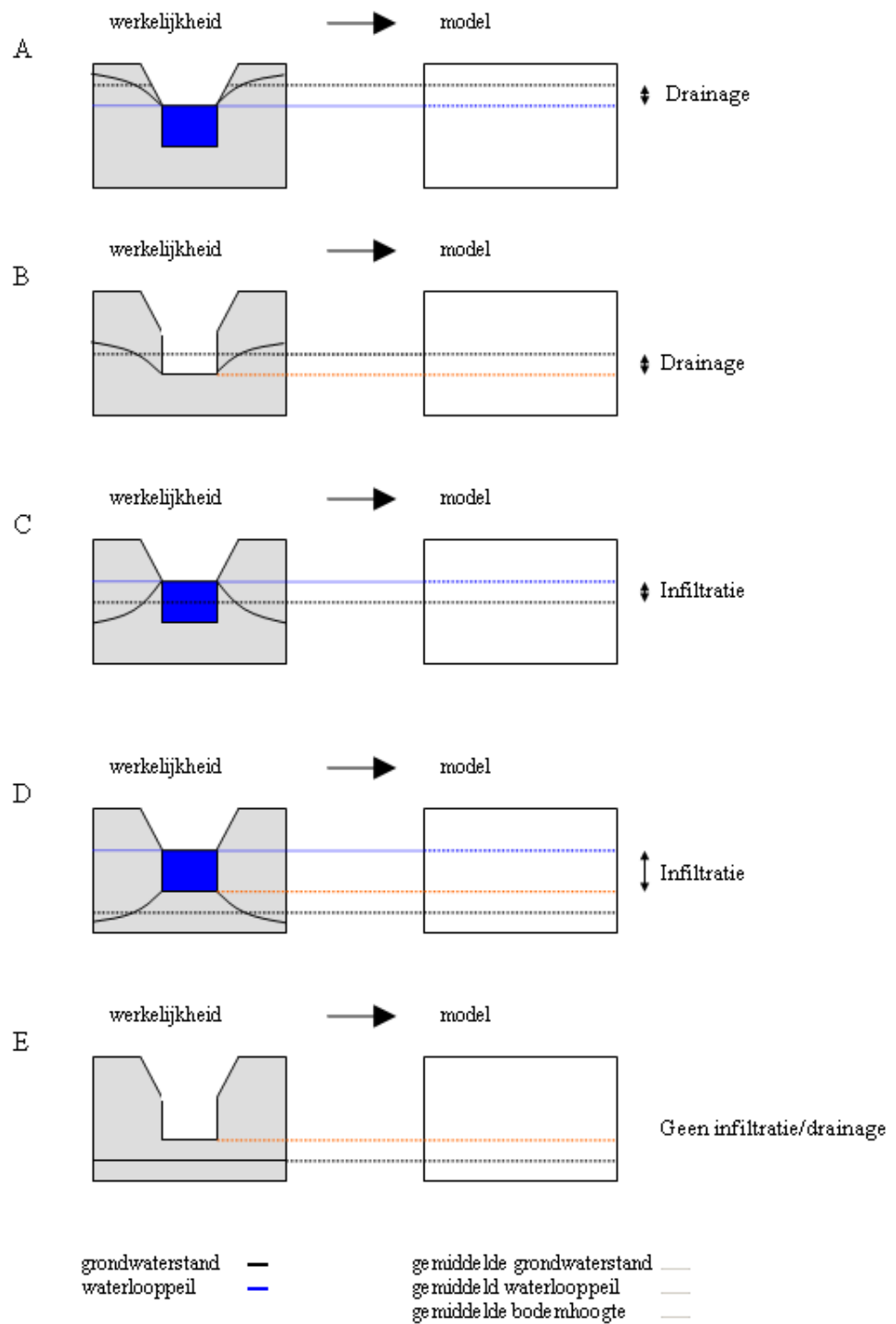
In het Modflow-grondwatermodel zijn de legger waterlopen met bijbehorende variabelen binnen het waterschap Delfland in het grondwatermodel ingevoerd. Het grondwatermodel simuleert infiltratie vanuit en drainage naar het oppervlaktewatersysteem, maar berekent vervolgens geen oppervlaktewaterstandsveranderingen in het oppervlaktewatersysteem. Grondwaterberekeningen worden dus uitgevoerd met een vooraf opgegeven oppervlaktewaterpeil

De oppervlaktewaterlopen worden in Modflow beschreven met de volgende modelparameters:

1. Peil [m NAP];
2. Bodemhoogte [m NAP];
3. Natte oppervlak per cel van het grondwatermodel;
4. Weerstand voor drainagesituatie [in dagen];
5. Verhouding tussen weerstanden in drainage- en infiltratiesituatie [dimensieloos].

De relatieve hoogte van enerzijds het peil en de bodemhoogte en anderzijds de grondwaterstand bepalen de richting en de grootte van de drijvende kracht voor de uitwisseling tussen het oppervlaktewater en het grondwater. Stroming naar de waterlopen vanuit het grondwater (drainage) vindt in het model plaats als de berekende grondwaterstand boven de oppervlaktewaterstand of, in het geval van een droge waterloop, boven de bodem ligt (Figuur 4.1 – A, B).

Infiltratie vanuit de waterlopen naar het grondwater vindt in het model plaats als de berekende grondwaterstand onder de oppervlaktewaterstand in de modelcel zakt (Figuur 4.1 – C). Wanneer de berekende grondwaterstand onder de waterloopbodem zakt zal de maximale infiltratie optreden (Figuur 4.1 – D), droge waterlopen kunnen niet infiltreren (Figuur 4.1 – E).



Figuur 4.1: Grafische weergave drainage en infiltratie in het model.

Het meenemen van het oppervlaktewatersysteem waarbij de peilen niet fluctueren in de Modflow berekening, heeft de volgende consequenties:

- De oppervlaktewaterstanden worden als vaste waarden voor een bepaalde periode opgegeven, in principe zomer- en winterperioden. Variaties en tijdelijke aanpassingen (b.v. als gevolg van opstuwning of opwaaiing en maalstops of

- tijdelijke inlaat) worden verwaarloosd. Voor de stationaire berekeningen wordt het gemiddelde van zomer- winterwaterstand gebruikt;
- Drainage en infiltratie hangen af van het verschil tussen de vaste oppervlaktewaterstanden en de berekende grondwaterstanden. Infiltratie zal altijd plaatsvinden zolang het waterloopeil zich boven de grondwaterstand bevindt én er een waterlaag in de waterloop staat (Figuur 4.1 - D), ongeacht of dat water in het oppervlaktewatersysteem (van elders) beschikbaar is. Met andere woorden er wordt geen balans bijgehouden van de betreffende waterloop.

## 4.2 Modelparameters m.b.t. oppervlaktewater

Voor het gebied van het waterschap worden de modelparameters voor het basismodel met betrekking tot het oppervlaktewater niet overgenomen uit bestaande modellen, maar opgebouwd uit basisgegevens, zoals die door het waterschap zijn aangeleverd. De samenstelling van de modelparameters voor het basismodel zijn voor de polderwaterlopen en boezemwaterlopen beschreven in paragraaf 4.2.1 en 4.2.2. De oppervlaktewaterrandvoorwaarde wordt hierbij overal toegekend aan de bovenste modellaag. Voor het buitengebied geldt een vaste bovenrand die is overgenomen uit het PZH-model (Minnema et al., 2004).

### 4.2.1 Samenstelling polderwaterlopen

#### Oppervlaktewaterstand

De oppervlaktewaterstand wordt opgenomen in het model ten opzichte van NAP [m-NAP]. De waarden worden gebaseerd op zomer- en winterpeilen die door het waterschap zijn aangeleverd in een polderpeilvlakkenkaart met beheerspeilen. De polderpeilvakkenkaart is niet geheel gebiedsdekkend. Daarom is ook gebruik gemaakt van het peilenbestand met zomer en winterpeilen die voor het PZH model is ontwikkeld. Deze kaart is alleen gebuikt voor gebieden waar de peilvakkenkaart van Delfland geen peilinformatie bevatte.

Naast een polderpeilvakkenkaart is tevens een lijnenbestand met polderwaterlopen door het waterschap aangeleverd. Door middel van het ruimtelijk koppelen in ArcMap van de polderwaterlooplijnen met het bijbehorende peilvak (commando in Arcmap: join data on spatial location) worden de peilen aan het de juiste polderwaterloop toegekend. In Figuur 4.2 zijn de gemiddelde peilen van de polderwaterlopen in Delfland weergegeven die zijn aangemaakt uit de twee bovenstaande peilbestanden. De gemiddelde waterloopepeilen worden gebruikt voor de stationaire run die een gemiddelde grondwatersituatie simuleert over elf jaar (1994-2004). Voor de niet stationaire run (1994-2004) worden polderwaterlopen aangemaakt die zomer- en winterpeilen bevatten.

Vooralsnog is de oppervlaktewaterstand gelijk gesteld aan het peil en is geen rekening gehouden met verschillen door verhang binnen een peilvak, door opwaaiing, door maalstops en dergelijke.

#### Bodemhoogte

Onder de bodemhoogte wordt de onderkant van een eventuele sliblaag in de waterloop verstaan. Ook de bodemhoogte wordt in het model opgenomen ten opzichte van NAP [m-NAP].

Op basis van de waterdiepte kan een bodemhoogte van een polderwaterloop worden berekend worden door voor alle waterlopen het peil minus de waterdiepte te doen. De waterdiepte is door het waterschap Delfland aangeleverd in het polderwaterlopenbestand. Dit is een lijnenbestanden met diverse attributen, o.a. de bodemhoogte. Een bodemhoogte is voor ca. 90% van de polderwaterlopen bekend, dit kunnen bodemhoogten aan het begin of eind van een waterloop zijn of gemiddelde bodemhoogten. Voor de onbekende bodemhoogten is het peilenbestand van Zuid-Holland ontwikkeld voor het PZH model gebruikt.

### **Nat oppervlak**

Het nat oppervlak vormt de basis voor het toekennen van de oppervlaktewater-randvoorwaarden. Voor de polderwaterlopen bevat het Delfland bestand lijnelementen. Deze worden met een natte omtrek gecombineerd om het natte oppervlak te bepalen. Voor de polderwaterlopen wordt gebruik gemaakt van een bestand met breedtepunten van waterlopen afkomstig van Delfland om de natte omtrek (c.q. breedte) te bepalen. De breedtepunten zijn toegekend aan de dichtstbijzijnde polderwaterloop. Dit is een erg bewerkelijk proces dat tevens gepaard gaat met het nodige handwerk waarbij ook gekeken is naar het type waterloop en topografische kaarten.

### **Weerstand voor drainage- en infiltratiesituatie**

De weerstanden in de drainage- en infiltratiesituatie van de waterloop vormen een maat voor het gemak waarmee het water de waterloop kan binnendringen, respectievelijk verlaten. Deze weerstand is een samenstelling van de radiale weerstand en de weerstand van de waterloopbodem door o.a. slibvorming. De lekweerstand wordt uitgedrukt in dagen [d].

Lekweerstand in drainage- en infiltratiesituatie zijn over het algemeen niet bekend per waterloop. Wel is expertkennis aanwezig over de orde van grootte van deze parameter. De grootte varieert van minder dan een dag tot  $\pm 100$  dagen, al naar gelang de onderhoudsituatie van de waterloop en het materiaal waaruit de waterloopbodem is opgebouwd.

Deze parameter wordt door de uitvoerende modelspecialisten zo goed mogelijk geschat. In eerste instantie wordt voor alle oppervlaktewater een lekweerstand aangehouden van 1 dag. Naar verwachting is de infiltratieweerstand altijd hoger dan de drainageweerstand omdat er in een infiltratiesituatie meer kans is op dichtslibbing van de waterloopbodem. Daarom wordt een infiltratieweerstand aangehouden die twee maal de drainageweerstand is. Bij de ijking zal de lekweerstand gevarieerd worden. Dit onderscheid is in de standaard Modflow rekencode niet mogelijk maar is de gebruikte versie ingebouwd.

#### *4.2.2 Samenstelling boezemwaterlopen*

### **Oppervlaktewaterstand**

Een constant boezempeil voor zomer en wintersituatie van -0,42 m. –NAP is in het grondwatermodel toegepast. Dit boezempeil is verkregen op basis van informatie van waterschap Delfland. In Figuur 4.2 zijn de boezemwaterlopen met bijbehorend peil weergegeven.



**Bodemhoogte**

Een schatting van de waterdiepte voor de boezemwaterlopen is gemaakt door middel van het type waterloop in het Delfland boezembestand. De boezemwaterlopen hebben in dit bestand de volgende 3 codes meegekregen;

code 19 = primair boezemwater

code 23 = secundair boezemwater

code 26 = tertiair boezemwater

De bodemhoogte is op basis van deze drie codes geschat. Een primaire boezemwaterloop ligt op 3,42 m -NAP, een secundaire boezemwaterloop op 2,42 m -NAP en een tertiaire waterloop op 2,22 m -NAP

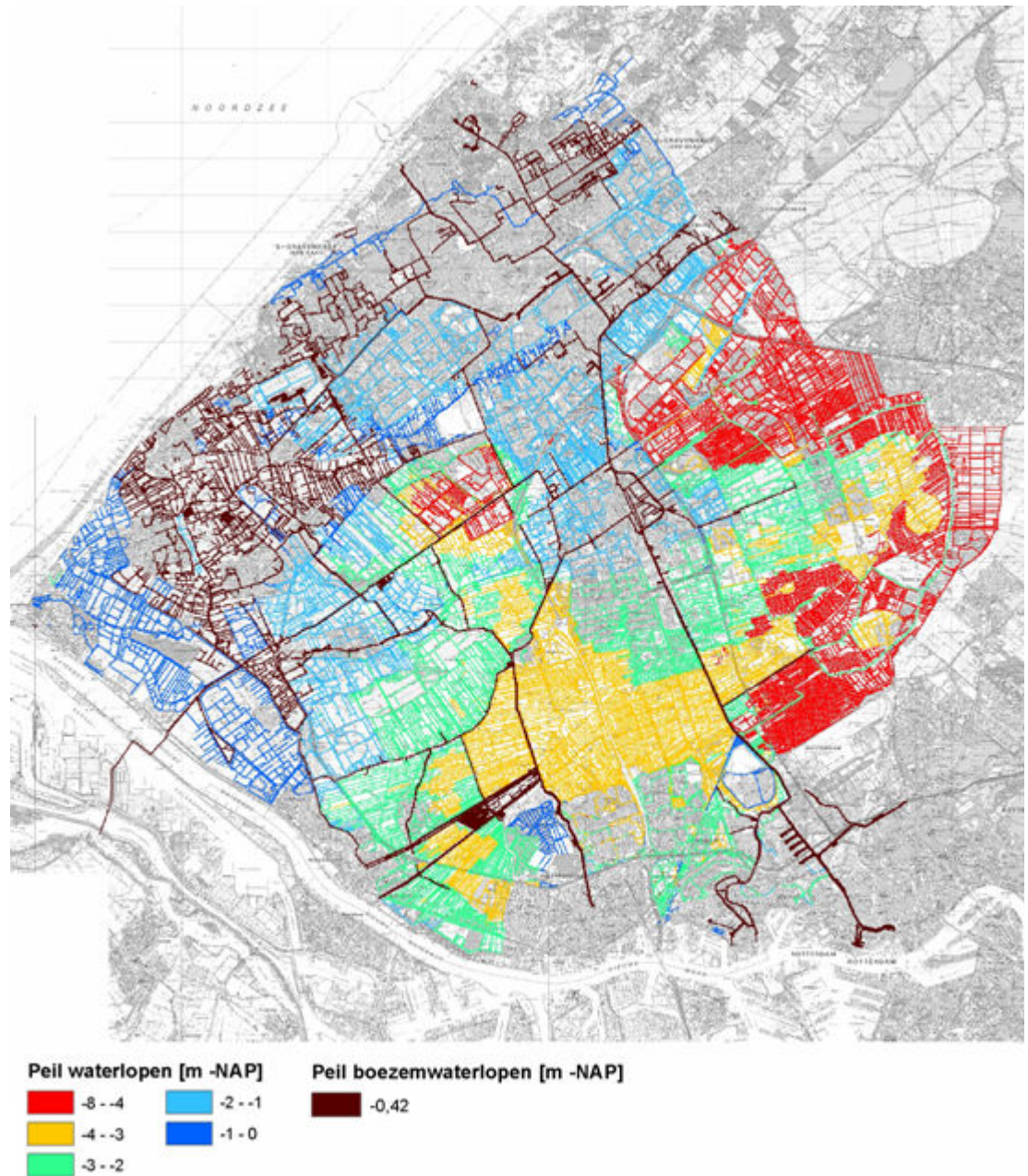
**Nat oppervlak**

Het nat oppervlak van de boezemwaterlopen wordt bepaald uit het boezemvlak bestand, geleverd door het waterschap Delfland. De boezemwaterlopen zijn in boezemwatervlak opgenomen als polygonen en hieruit kan direct het natte oppervlak per cel bepaald worden.

**Weerstand voor drainage en infiltratie situatie [in dagen]**

Er is geen informatie beschikbaar over weerstanden van de boezemwaterlopen. In eerste instantie wordt daarom voor alle oppervlaktewater een standaard lekweerstand aangehouden van 1 dag en een twee keer zo hoge infiltratieweerstand. Bij de ijking zal de lekweerstand gevarieerd worden.

Zie voor meer informatie de beschrijving van de weerstand bij polderwaterlopen.



Figuur 4.2: Peil polderwaterlopen en boezemwaterlopen

#### 4.2.3 Interactie boezem- en polderwaterlopen

Het blijkt dat er lokaal grote peilverschillen in het oppervlaktewater kunnen optreden. Op meerdere plaatsen liggen vlak naast de boezem met een relatief hoog peil waterlopen met een peil dat soms wel enkele meters lager is. Bij het een-op-een vertalen van deze basisinformatie naar model invoer komt het voor dat dergelijke waterloopelementen in dezelfde modelcel (25 meter breed) terecht komen. Dit kan leiden tot conceptuele fouten in het model waarbij binnen een cel ten onrechte te veel water vanuit de boezem richting de polderwaterloop of de greppel loopt. Ten onrechte omdat er in werkelijkheid een stromingsweerstand (de ondergrond) tussen de beide

waterloop bestaat terwijl in het modelconcept de waterlopen slechts door de gezamenlijke bodemweerstand worden gescheiden.

Om dergelijke kortsluitstromingen te voorkomen is besloten om in een modelcel van 25 meter waarin een boezemwaterloop ligt geen polderwaterloop toe te staan. Dat zelfde geldt ook in het geval er drainage in dezelfde cel is verondersteld.

#### *4.2.4 Extra informatie waterlopen*

In deze paragraaf is uitgelegd welke extra informatie er is toegevoegd om het waterlopenbestand compleet te maken. Het gaat hierbij om extra informatie voor de waterlopen in Delft, Vlaardingen, watervlakken in Delfland en extra peilinformatie Abtswoude incl. kerkpolder, Eshofpolder, Haagse Beek, Leidschenveen en Noordpolder.

##### *Waterlopen Delft*

Van de gemeente Delft is extra peilinformatie verkregen voor de waterlopen in Delft. Deze informatie is als een Autocad file aangeleverd (zie Figuur 4.3) en kon niet automatisch een-op-een gekoppeld worden. Daarom zijn met meerdere GIS-bewerkingen de juiste peilen, geleverd als puntdata, zo goed nauwkeurig mogelijk aan de juiste waterlopen gekoppeld.

##### *Watervlakken*

De watervlakken zijn bekend als GIS polygonen die door Delfland zijn aangeleverd. Hiervoor is een GIS-bwerekking ontwikkeld die zorgt dat een deel van de polderwatervlakken in de waterlopen module komt. Hierbij worden alleen poldervlakken met enige omvang toegevoegd, omdat anders dubbeling optreedt met ter plaatse aanwezige waterlopen. De bodem en het peil van de waterlopen worden hierbij geschat op basis van het AHN.

##### *Vlaardingen*

In het polderwaterlopenbestand van Delfland missen waterlopen in van het deel van de gemeente Vlaardingen onder de A20. Deze zijn met behulp van een topografische kaarten handmatig aangemaakt. Het peil en de bodem van de waterlopen in Vlaardingen worden ingeschat op basis van het AHN maaiveld. Het werkelijke, meer gedetailleerd beeld, is in een later stadium als PDF ontvangen maar niet een-op-een verwerkt in het bestand.

##### *Correcties bij Abtswoude incl Kerkpolder, Eshofpolder, Haagse Beek, Leidschenveen en Noordpolder*

Extra peilinformatie is geleverd door Delfland bij Abtswoude incl. Kerkpolder, Eshofpolder, Haagse Beek, Leidschenveen en Noordpolder., Deze extra peilinformatie is toegevoegd aan de shape file van het polder- en boezempeilvakkenbestand geleverd door Delfland en verwerkt in de waterlopen van het grondwatermodel.

##### *Infiltratie duinen*

In de duinen zijn extra infiltratievijvers ingebracht ter plaatse van de drinkwateronttrekking van Monster, zie hoofdstuk 'Grondwateronttrekkingen' in dit rapport. Deze infiltratievijvers zijn als waterlopen opgenomen in het waterlopenbestand. Het waterpeil en de bodem van deze infiltratievijvers is geschat op basis van het AHN. Volgens opgave wordt per jaar 5 miljoen m<sup>3</sup> geïnfiltreerd water gewonnen. Deze



## 5 Drainage

### 5.1 Inleiding

De drainagemodule van Modflow is gebruikt om de effecten van drainage (zowel greppels als buisdrainage) in het landelijke gebied en drainage in de stad te simuleren. Samen met de oppervlaktewater-elementen in de RIV-module van Modflow (zie hoofdstuk 4) wordt hiermee het topsysteem gemodelleerd. Door beide modules wordt het topsysteem binnen Delfland beschreven, voor het modelgebied daarbuiten is gekozen voor een vaste randvoorwaarde op basis van de polderpeilen uit het Provincie Zuid Holland grondwatermodel.

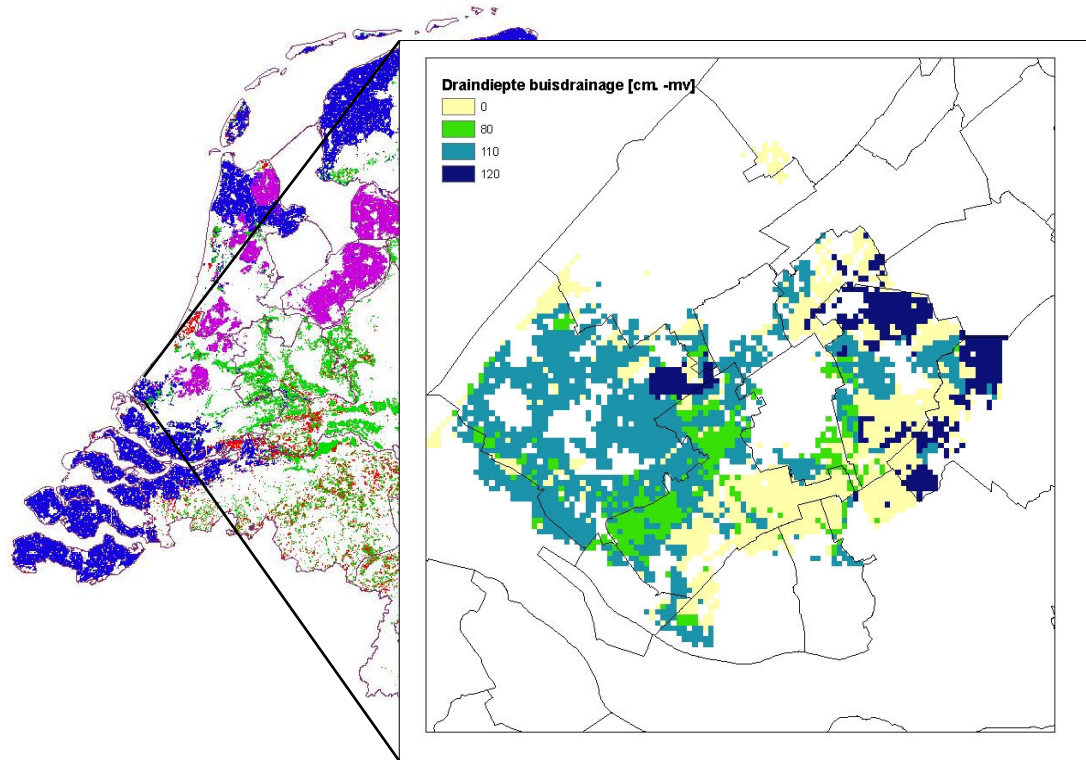
De werking van de drainagemodule in Modflow is als volgt. De drainagemodule voert water af uit de modellaag waarin drainage is gedefinieerd; bij het grondwatermodel de eerste modellaag. Het debiet wordt bepaald door de drainageweerstand en het verschil in stijghoogte tussen de modellaag en de drainagebasis. Zolang de stijghoogte van de watervoerende laag boven de drainagebasis ligt voert de drain water af, ongeacht of dat water in het oppervlaktewatersysteem (van elders) beschikbaar is. Met andere woorden er wordt geen balans bijgehouden van de betreffende waterloop. Wanneer de stijghoogte echter beneden de drainagebasis ligt dan is de drainage buiten werking en wordt dus geen water afgevoerd.

### 5.2 Drainage in het landelijke gebied

Buisdrainage is in Nederland niet landsdekkend geïnventariseerd en de aanwezigheid van buisdrainage is veelal slecht bekend. Kennis over de aanwezigheid van buisdrainage in combinatie met de diepte en de weerstand is van belang om bij modellering de grondwaterstand juist te kunnen voorspellen. Deze behoefte is ook bij eerdere studies gevoeld, zoals bij STONE (Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel) en bij de verdrogingstudie (RIZA). Voor STONE is aanvankelijk gebruik gemaakt van een eenvoudige kennistabel. Voor de Verdrogingstudie is een landelijke kaart gemaakt. Hiervoor zijn gebieden geïnventariseerd waarvoor de buisdrainage gebiedsdekkend bekend is (Massop 2002). Voor deze gebieden zijn vervolgens relaties gelegd tussen aanwezigheid van buisdrainage en karteerbare kenmerken zoals landgebruik, bodem en grondwatertrap (GT). De gevonden relaties zijn vervolgens gebruikt om een landsdekkende kaart met buisdrainage te maken. Deze kaart is vervolgens voorgelegd aan de waterschappen, de inbreng van de waterschappen heeft vervolgens tot een aantal aanpassingen geleid. De resulterende kaart is gebruikt in de Verdrogingstudie en voor STONE. De buisdrainagekaart is een statistische kaart, d.w.z. dat voor grotere gebieden het areaal buisdrainage ongeveer klopt, echter op perceelsniveau zal de kaart mogelijk niet kloppen. In Figuur 5.1 is de buisdrainagekaart van STONE afgebeeld.

Deze kaart is in eerste instantie gebruikt als drainagekaart binnen het onderzoek en gepresenteerd tijdens de eerste workshop. Tijdens deze workshop zijn door de waterschappen een aantal opmerkingen gemaakt m.b.t. de aanwezigheid van buisdrainage. Deze opmerkingen zijn verwerkt in de buisdrainagekaart.

De buisdrainage informatie van Stone bleek echter te grof bij simulaties met het fijne grondwatermodel (cellen 25mx25m). De Stone data bevat geschatte locaties van drains en peilen t.o.v. maaiveld. Deze data is voor een 25 m grondwatermodel te grof gebleken en geeft fouten.

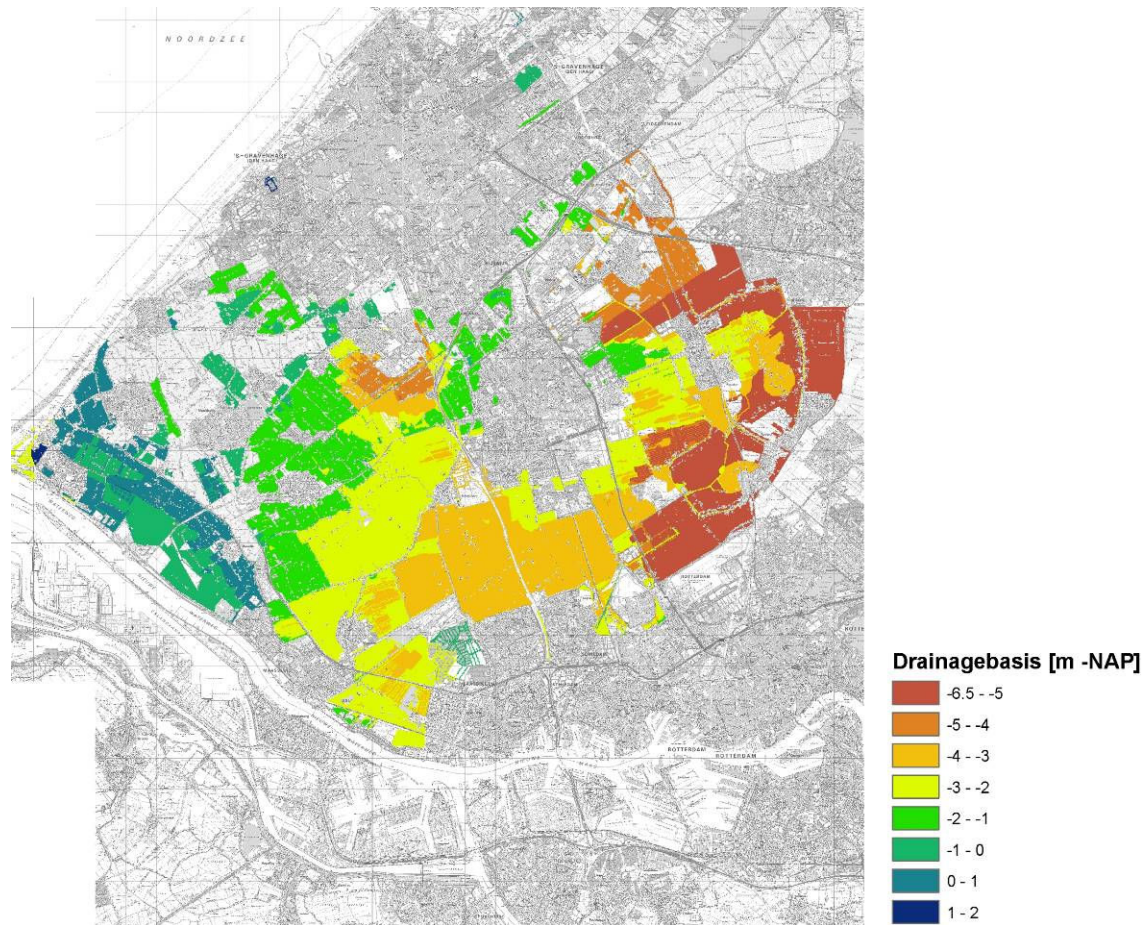


Figuur 5.1: Landelijke buisdrainagekaart t.b.v. Stone binnen Delfland

Bij een volgende versie van de drainagemodule is gekozen om de landgebruikkaart LGN4-kaart van Alterra te gebruiken om de locaties van drainage te bepalen. Drainage is in het grondwatermodel toegepast bij landgebruikfuncties 'grasland', 'tuinbouw' en 'stedelijk gras'. De drainagebasis is bepaald in overleg met het waterschap op basis van de volgende regels:

- als de drain in een modelcel met een waterloop ligt dan wordt de drainagebasis 10cm boven waterloopeil gelegd;
- als een drain in een modelcel binnen het polderpeilgebied ligt dan wordt de drainagebasis 10 cm boven het polderpeil gelegd;
- alle overige modelcellen krijgen een drainagebasis van 70 cm beneden maaiveld.

De drainageweerstand van de landelijke drainage is op basis van aanwezige ervaring geschat op 125 dagen. De nieuwe drainagekaart is weergegeven in Figuur 5.2.



Figuur 5.2: Drainagebasis voor het landelijk gebied binnen Delfland

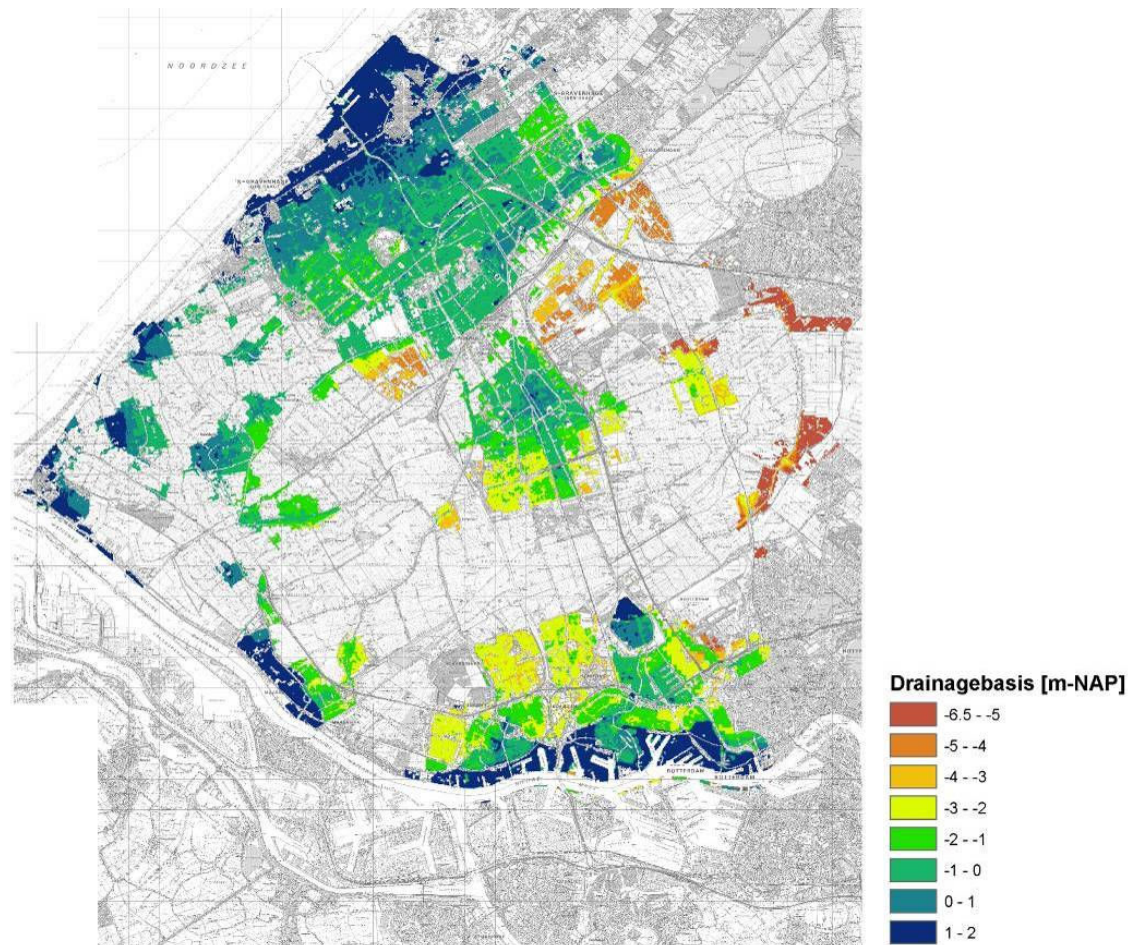
### 5.3 Stedelijke drainage

De kennis over de aanwezigheid van buisdrainage splitst zich in hoofdzaak toe op landbouwkundig in gebruik zijnde percelen. Ook niet landbouwkundig in gebruik zijnde percelen, kunnen gedraineerd zijn onder andere door cunetdrainage, buisdrainage onder sportvelden, begraafplaatsen, plantsoenen en onbekende lekkende riolen, gedempte sloten en particuliere drainage. De uiteindelijke drainagekaart voor het projectgebied is daarom gebaseerd op de samenvoeging van twee deelkaarten. De eerste deelkaart heeft betrekking op landbouwkundig in gebruik zijnde percelen en de tweede deelkaart bevat drainage in stedelijk gebied.

Voor deze studie is aangenomen dat alle stedelijke gebieden gedraineerd zijn. Deze aanname is gebaseerd op ervaringen in projectstudies in o.a. Amstelveen. Voor de bepaling van de ligging van stedelijk gebied en infrastructuur is net als bij de buisdrainage de LGN4-kaart gebruikt. In stedelijk gebied wordt de drainage op 100 cm. beneden maaiveld gelegd. De drainageweerstand is hier op basis van ervaring geschat op 100 dagen.

De delen van de duinen vallen volgens LGN4 kaart binnen het stedelijk gebied. Hier komt nu dus ook automatisch drainage te liggen. Dit betekent overigens niet dat er ook

daadwerkelijk drainage wordt berekend, omdat de grondwaterstand veel lager ligt dan de drainagebasis zoals die voor de duinen is berekend.



Figuur 5.3: Stedelijke drainagebasis in Delfland

#### 5.4 Conceptverbetering

In de vorige paragrafen is beschreven op welke wijze drainage is toegepast. Voor beide typen drainage is de ligging bepaald aan de hand van het LGN4 bestand. Lopende het onderzoek is ontdekt dat dit concept geoptimaliseerd moest worden omdat het op plekken leidde tot onrealistische modeluitkomsten; ter plaatse van de boezem werd enorm veel water gedraineerd.

De verklaring is dat de situatie ontstond waarin drainage ook in cellen met een boezemelement terecht kwam. Op veel plekken is er een groot peilverschil tussen de geschatte drainagebasis en de boezem. Daarbij komt dat de enige weerstand tussen de boezem en de drainage binnen een cel de gesommeerde bodemweerstand is terwijl in werkelijkheid ook de weerstand door de bodem van invloed is. Door deze modelmatig gezien te lage weerstand kon water eenvoudiger vanuit de boezem richting de drains stromen. Zo ontstaat onrealistische kortsluitstroming.



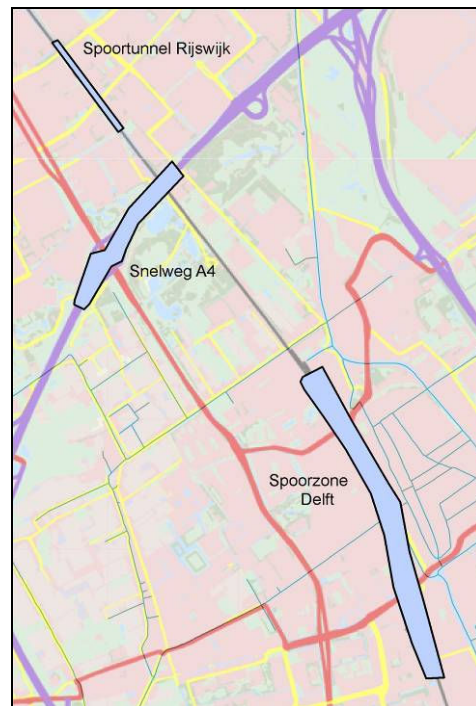
Deze situatie is in het model opgelost door in die cel (25x25 m) waar een boezemelement voorkomt géén drainage te veronderstellen.

## 5.5 Drainage bij bijzondere constructies

Naast de landelijke en stedelijke drainage zijn er enkele constructies waarbij overtollig grondwater wordt weggepompt. Voorbeelden hiervan zijn het verdiepte deel van de autosnelweg A4 bij Rijswijk en de spoortunnel bij het station in Rijswijk. Ook bij de geplande spoorzone in Delft zal zeer waarschijnlijk overtollig grondwater worden gedraineerd.

In het model zijn deze constructies volgens het volgende concept ingebracht. In Modflow is het mogelijk om een HFB module (horizontal flow barrier) te gebruiken, te vergelijken met het effect van een damwand. In de HFB module wordt een lijn rondom de constructies gedefinieerd ter plaatse waarvan de horizontale doorlatendheid kan worden opgegeven dan wel verlaagd (zie Figuur 5.4). In het model is een verlaging van de  $kD$  waarde met een factor 1000 ingevoerd.

Op deze manier gemodelleerd kan de drainage die onderin de constructie is aangelegd meer water gaan afvoeren dan in werkelijkheid het geval omdat bij de meeste constructies grondwateraanvulling vanuit de neerslag niet meer zal voorkomen. In het ideale geval zal daarom ook de RCH module ter plaatse van de constructie moeten worden verlaagd dan wel op nul gezet.



Figuur 5.4: Ligging bijzondere constructies



## 6 Grondwateraanvulling

### 6.1 Concept grondwateraanvulling

Grondwateraanvulling is de uitwisselingsflux tussen de onverzadigde zone of atmosfeer en het freatische grondwater. Voor de bepaling van de grondwateraanvulling wordt het CAPSIM-modelconcept toegepast dat door Alterra is ontwikkeld (Veldhuizen et al 1998a).

In onderstaande tekst is uitgelegd hoe het concept grondwateraanvulling in de modelcode is verwerkt. Ter illustratie van de onderlinge relaties van de verschillende componenten is Figuur 6.1 toegevoegd.

De drijvende kracht achter de grondwateraanvulling is de atmosfeer. Twee termen zijn hier van belang: de neerslag en de verdampingsvraag. De neerslag die op de bodem of op de vegetatie terecht komt maakt deze om te beginnen eenvoudigweg nat. De atmosfeer kan er voor zorgen dat dit water weer verdampt. Er is sprake van *interceptieverdamping*. Conceptueel wordt vegetatie als interceptiereservoir beschouwd.

Het water dat het bodemoppervlak heeft bereikt weet derhalve in de bodem te dringen, te *infiltreren*. De toplaag van de bodem is de zone waaruit de vegetatie met zijn wortels direct water kan onttrekken t.b.v. de *gewasverdamping*. Deze zone heet de wortelzone en conceptueel is dit een bergingsreservoir. Zoals alle reservoirs heeft ook dit reservoir een maximale opslagcapaciteit. Als deze wordt overschreden verlaat het teveel aan water de wortelzone aan de onderkant en stroomt richting de verzadigde grondwaterstand. De ondergrond (en in voorkomende gevallen de wortelzone) staat in direct contact met het freatische grondwater; de stroming van de onverzadigde zone richting het freatische grondwater heet *percolatie*. Gedurende de zomer droogt de wortelzone echter uit, waardoor een tegengestelde stroming kan ontstaan: zogenaamde *capillaire opstijging*.

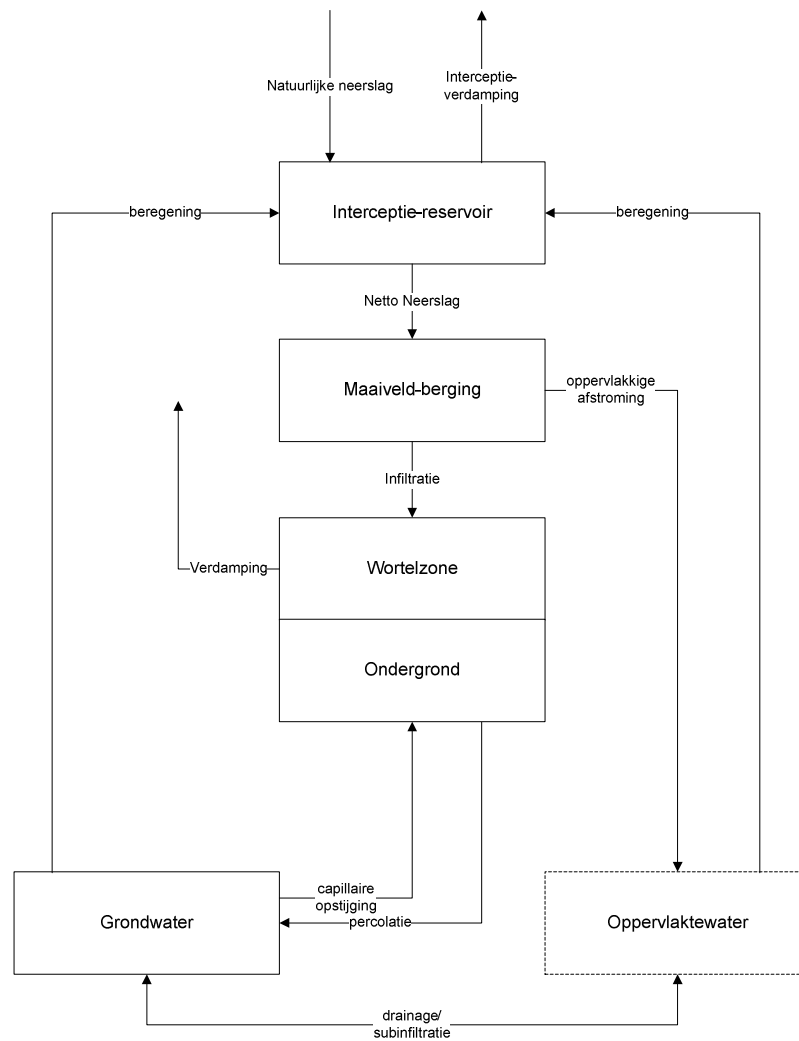
De grondwaterstand beïnvloedt (in)direct de grondwateraanvulling op de volgende manier:

- De capillaire opstijging is mede afhankelijk van de grondwaterstand;
- De maximale inhoud van de onverzadigde zone is mede afhankelijk van de grondwaterstand.

Er is daarom besloten om in samenwerking met Alterra<sup>1</sup> het grondwateraanvullingsconcept in het niet-stationaire model on-line op te nemen in de MODFLOW-code. Dat wil zeggen dat op tijdstapbasis per cel de grondwaterstand wordt doorgegeven aan de grondwateraanvullingsmodule en dat de grondwateraanvullingsmodule per tijdstap een grondwateraanvulling teruggeeft.

---

<sup>1</sup> Alterra is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en maakt deel uit van Wageningen Universiteit en Researchcentrum (Wageningen UR).



Figuur 6.1: Schematische weergave processen aan maaiveld

Er is geen informatie bekend over significante toepassing van beregening in Delfland. Daarom is dit onderdeel niet in de berekening opgenomen.

Met betrekking tot de grondwateraanvulling moeten voor iedere cel in het modelgebied acht parameters bekend zijn. Deze worden in de komende paragrafen afzonderlijk toegelicht. Het zijn de parameters:

- Neerslag;
- Verdamping.
- Landgebruik;
- Percentage verhard;
- Percentage permanent oppervlaktewater;
- Bodemfysische eenheid;
- Infiltratiecapaciteit van de bodem;
- Wortelzonedikte.

### 6.1.1 *Neerslag*

Rond Delft en in de regio worden op verschillende locaties metingen van de neerslag uitgevoerd. Voor invoer in het CAPSIM-modelconcept dienen alle, als invoer te gebruiken stations, reeksen voor neerslag en verdamping complete beschikbaar te zijn. Wanneer enkele metingen mochten ontbreken kunnen mbt bepaalde technieken eventueel worden geschat.

Voor de simulatieperiode (1994-2004) zijn uiteindelijk twee tijdreeksen bruikbaar, o.a. omdat het complete reeksen zijn met dagelijkse sommen van de neerslag en verdamping. Het gaat om de tijdreeksen voor Rotterdam (KNMI meetpunt 334) en Delft (KNMI meetpunt 4323). Op basis van thiessenpolygonen wordt voor elke modelcel bepaald welke van beide tijdreeksen van toepassing wordt.

### 6.1.2 *Verdamping*

De verdamping in het modelconcept is een combinatie van de gewasverdamping en de verdamping van kale grond. Aangezien we gebruik maken van de methode van Makkink om de verdamping te berekenen maken we geen onderscheid tussen bodemverdamping en gewastranspiratie. De gewasfactoren zijn immers afgeleid om de evapotranspiratie (combinatie van bodemevaporatie en gewastranspiratie) te berekenen.

In geval van inundatie wordt aangenomen dat de verdamping gelijk is aan die van open water. Indien er sprake is van interceptie, reageert het water in het interceptiereservoir als open water (zolang de voorraad strekt).

De potentiële gewasverdamping kan worden berekend door de Makkink-verdamping te vermenigvuldigen met de gewasfactor van het betreffende gewas. De potentiële verdamping is de maximale verdamping en kan afhankelijk van de beschikbaarheid van vocht in de wortelzone reduceren. Hiervoor gebruiken we de methode van Feddes (1978).

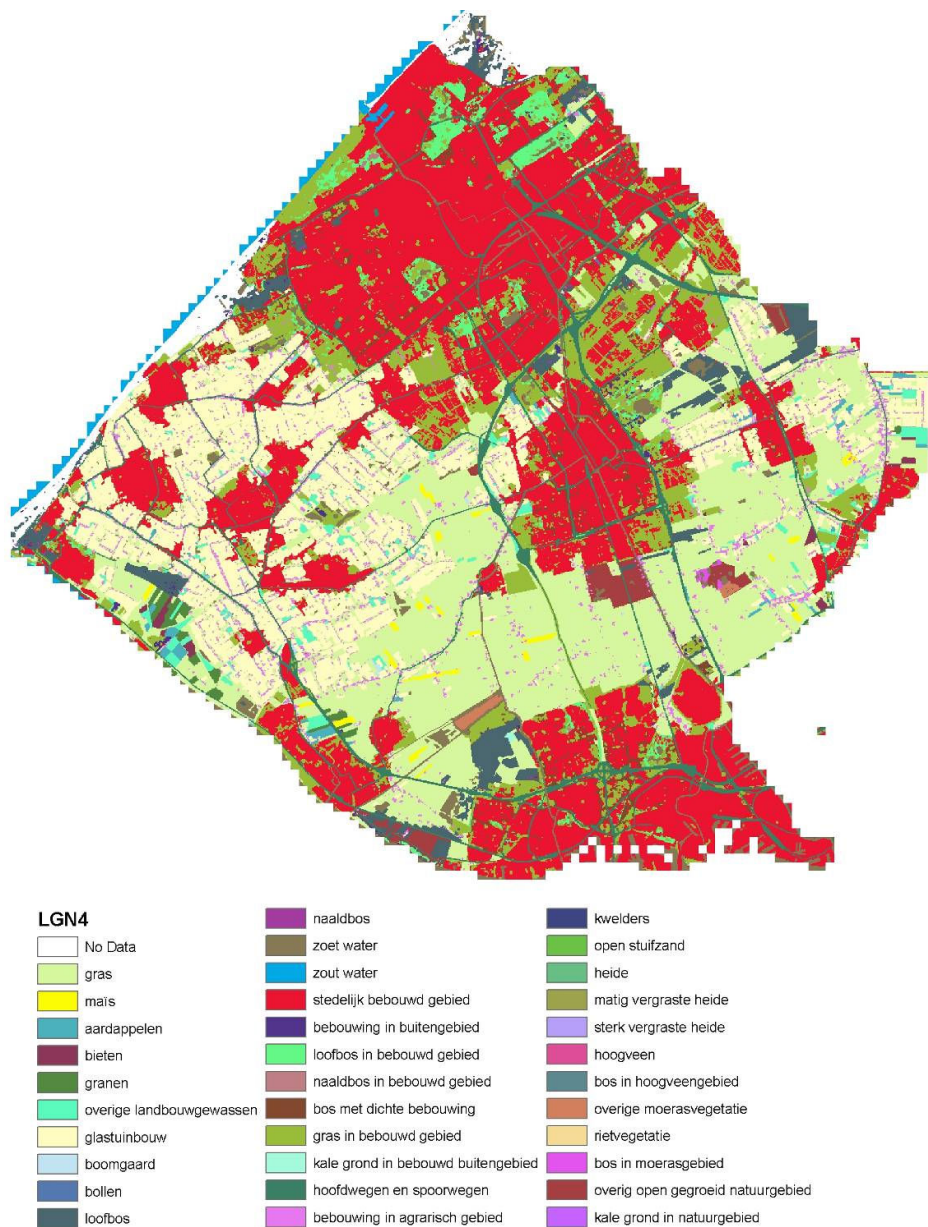
Om de potentiële verdamping te berekenen zijn voor een aantal gewassen gewasfactoren verzameld. Dit zijn tabellen met een gewasfactor per kalenderdag vanuit het Cultuurtechnisch Vademecum (Cultuurtechnische Vereniging, 1988). De verdampingsreductie wordt bepaald met de Feddes-functies. Deze kennistabellen gekoppeld aan bodem/landgebruik zijn beschikbaar gesteld door Alterra, evenals de tabellen voor wortelzonedikte en de infiltratiecapaciteit.

### 6.1.3 *Landgebruik*

Het landgebruik is van belang voor de bepaling van:

- De gewasfactoren (omrekening referentieverdamping naar potentiële verdamping);
- De grootte van het interceptiereservoir.

Het landgebruik is per gridcel overgenomen uit het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN4). In Figuur 6.2 zijn de grondgebruiksklassen voor Delfland weergegeven.



Figuur 6.2: Landgebruik volgens LGN4

#### 6.1.4 Percentage verhard oppervlak

Aangenomen is dat verhard gebied niet meedoet bij de bepaling van de grondwateraanvulling. Het percentage verhard in het aandachtsgebied is als volgt bepaald. Er is aangenomen dat 40 % van de LGN-codes 18 (stedelijk bebouwd), en 25 (hoofdwegen) verhard is. Voor het gehele modelgebied geldt dat 80 % van LGN-code 8 (glastuinbouw) als verhard is aangemerkt.

### 6.1.5 *Percentage permanent oppervlaktewater*

De grondwateraanvulling van (permanent) oppervlaktewater is op nul gesteld. De interactie tussen oppervlaktewater en grondwater, zowel infiltratie als drainage wordt gesimuleerd in de zogenaamde RIV-package van Modflow.

### 6.1.6 *Bodemfysische eenheid (PAWN-eenheden)*

De bodemfysische eenheid is de vertaling van de bodemkaart 1:50.000 naar een van de 21 zogenaamde PAWN-eenheden. Hiervoor wordt de door Alterra vervaardigde koppeltabel gebruikt. De bodemfysische eenheid is van belang voor:

- De berekening van de capillaire opstijging;
- De berekening van de vochtvoorraad van de wortelzone.

### 6.1.7 *Infiltratiecapaciteit van de bodem*

De infiltratiecapaciteit van de bodem bepaalt met welke snelheid neerslagwater in de bodem kan indringen en is daarmee voor een belangrijk deel sturend voor de berekening van onverzadigde oppervlakkige afstroming. De infiltratiecapaciteit is afgeleid van de verzadigde doorlatendheid van de toplaag van de bodem.

### 6.1.8 *Wortelzonedikte*

De dikte van de wortelzone is bepalend voor de bepaling van de vochtvoorraad in de wortelzone. De dikte wordt in de praktijk bepaald door:

- Het gewas;
- De bodem;
- Het grondwaterregime.

Daarbij is het gewas doorgaans de meest bepalende factor. In deze versie van het model is de wortelzonedikte alleen afhankelijk gesteld van het gewas.

De vochtvoorraad in de wortelzone bepaalt of de verdamping wordt gereduceerd. In combinatie met de ondergrond blijkt of er sprake is van capillaire opstijging (bij vochttekort) dan wel percolatie (bij oververzadiging) die daadwerkelijk grondwateraanvulling oplevert.

De maximale vochtvoorraad in de onverzadigde zone en de bergingscoëfficiënt van het freatische grondwatersysteem is een functie van de bodem, de wortelzonedikte en de grondwaterstand. Deze wordt afgeleid uit kennistabellen die zijn berekend met het model CAPSEV (Wesseling, 1991). In deze kennistabellen is ook de capillaire opstijging vastgelegd als functie van de grondwaterstand, de wortelzonedikte en de vochtvoorraad in de wortelzone.

## 6.2 **Resultaat grondwateraanvulling berekend met Capsim**

De grondwateraanvulling zoals beschreven is alleen berekend voor het gebied van Delfland. Daarvan zijn alle benodigde gegevens bekend. In het gebied erbuiten zijn in navolging van het PZH model vaste peilen opgenomen.

### 6.2.1 *Niet stationair*

Tijdens de simulatieperiode van 1994-2004 wordt door Capsim op dagbasis berekend wat de grondwateraanvulling zou moeten zijn. Op basis van die tijdreeks zijn

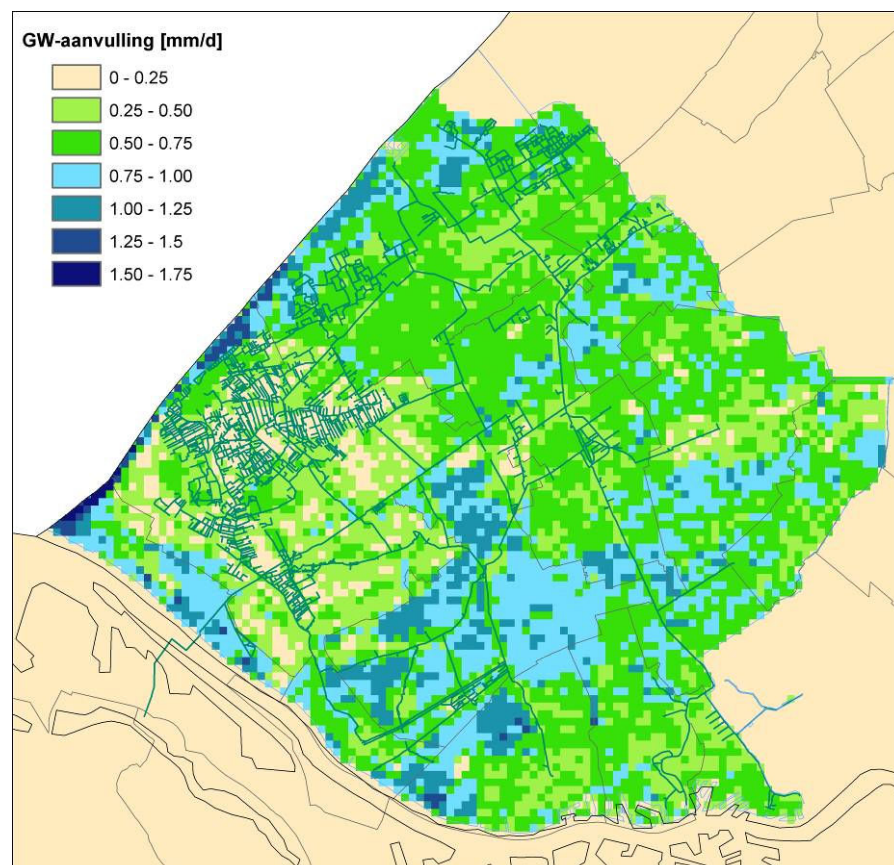
jaarbalsen opgesteld. Onderstaande tabel geeft daarvan voor het gebied van Delfland een overzicht.

Tabel 6.1: Jaargemiddelde grondwateraanvulling voor Delfland [mm/dag]

jaartal	aanvulling	jaartal	Aanvulling
1994	0,84	2000	1,48
1995	0,58	2001	0,51
1996	0,43	2002	0,12
1997	0,37	2003	-0,23
1998	1,48	2004	0,28
1999	0,73	<i>gemiddeld</i>	<i>0,60</i>

### 6.2.2 Stationair

De grondwateraanvulling voor het stationaire grondwatermodel is berekend door het gemiddelde te nemen van de berekende grondwateraanvulling op dagbasis van het niet stationaire grondwatermodel (periode 1994-2004). In Figuur 6.3 is de gemiddelde grondwateraanvulling in mm/dag weergegeven.



Figuur 6.3: Gemiddelde grondwateraanvulling voor stationair grondwatermodel



### **6.3 Grondwateraanvulling gewijzigd**

In de afrondingsfase van het onderzoek is vast komen te staan dat er een modelverbetering moest worden doorgevoerd op het onderwerp grondwateraanvulling. Het addendum aan het slot van de rapportage geeft een de toelichting hierop.



## 7 AHN filtering

### 7.1 Inleiding

In een geohydrologisch onderzoek is het noodzakelijk om over een goed maaiveld te beschikken. Het maaiveld wordt namelijk voor diverse toepassingen in het geohydrologisch onderzoek gebruikt:

- Bij de ontwikkeling van het 3D model van de deklaag markeert het de bovenzijde van het pakket;
- Daar waar waterpeilen of ontwateringdiepten niet bekend zijn worden deze meestal geschat ten opzichte van maaiveld;
- In de niet stationaire grondwatermodellering moet de ligging van het maaiveld bekend zijn omdat de dikte van de onverzadigde zone direct afhangt van die ligging;
- Uitkomsten van het model worden gepresenteerd t.o.v. maaiveld zoals bij de GHG en GLG kaarten. Ook wateroverlast wordt afhankelijk met de waterstand t.o.v. maaiveld uitgedrukt.

Dit hoofdstuk beschrijft de wijze waarop dit voor het DSM onderzoek tot stand is gekomen, welke bronnen zijn gebruikt en welke aannames zijn gedaan.

### 7.2 Gebruikte bronbestanden: AHN4 en Regis2

Voor het gebied van Delfland is versie 4 van het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN 4) als uitgangspunt genomen. De resolutie hiervan is 5x5 meter. Buiten Delfland is zonder verdere aanpassing gebruik gemaakt van het maaiveld zoals dat voor REGIS 2 (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem) is vastgesteld.

Het AHN (Algemeen Hoogtebestand Nederland) is een digitaal bestand dat de maaiveldhoogte representeert. Dit bestand is verkregen door middel van laser-altimetrie vanuit een vliegtuig. De scanners onder het vliegtuig 'zien' het oppervlak van de aarde dat onder andere kan bestaan uit huizen en/of gebouwen. Het AHN bestand is niet volledig vlakdekkend en het bevat gebieden waar geen maaiveld hoogte bepaald is. Dit zijn over het algemeen de grotere open water locaties, waar de lasersignalen worden verstoord door spiegelingen.

Ten behoeve van een hydrologische modellering is het niet gewenst om maaiveld objecten (huizen, viaducten, bomen, etc.) in het hoogte bestand te hebben. Bovendien is het zo dat niet overal een maaiveldshoogte aanwezig is (spiegelende oppervlakken geven niet altijd een (correcte) hoogte). Ten behoeve van een vlakdekkend maaiveld is bij TNO een filtermethode ontwikkeld waarmee vanuit het originele AHN bestand (resolutie van 5x5 meter) een hydrologisch maaiveld kan worden gefilterd (AHN-filter).

Het ontwikkelde filter is ook in staat om een waterpeilenbestand te genereren. Naast het AHN bestand wordt dan ook het TOP10-vector bestand gebruikt in de filtering. Deze optie is in deze studie niet uitgevoerd omdat detailinformatie over waterpeilen door het waterschap is aangeleverd.

### 7.3 AHN-Filter

Het AHN filter bepaalt op basis van het AHN grid een hydrologisch maaiveld. Dit filter bestaat uit een aantal stappen en gedefinieerde criteria [criteria] die hieronder opvolgend beschreven worden. De criteria zijn bewust apart aangegeven, omdat hierin ruimte ligt om de methode te optimaliseren of aan te passen.

#### 7.3.1 *Traceren maaiveld*

In deze stap karakteriseren we de gebieden die ‘vlak’ zijn en gebieden die uit het maaiveld ‘steken’. We definiëren ‘vlak’ als die gebieden waarbinnen naastliggende gridcellen in het AHN bestand minder dan 0,50 m [criteria] in hoogte verschillen. Het vlak wordt samengesteld door van cel naar cel door het AHN grid te ‘lopen’ en vast te stellen of de volgende cel nog tot hetzelfde vlakke gebied behoort.

Als het totale ‘vlakke’ gebied meer dan 10.000 cellen [criteria] beslaat dan herkennen we dit gebied als maaiveld. Is het een kleiner gebied dan merken we het gebied aan als ‘potentieel’ maaiveld dat in een later stadium nog maaiveld kan worden. Dit betreffen bijvoorbeeld platte daken van huizen en gebouwen of juist kleine percelen omgeven door sloten.

#### 7.3.2 *Bepalen potentieel en ontbrekend maaiveld*

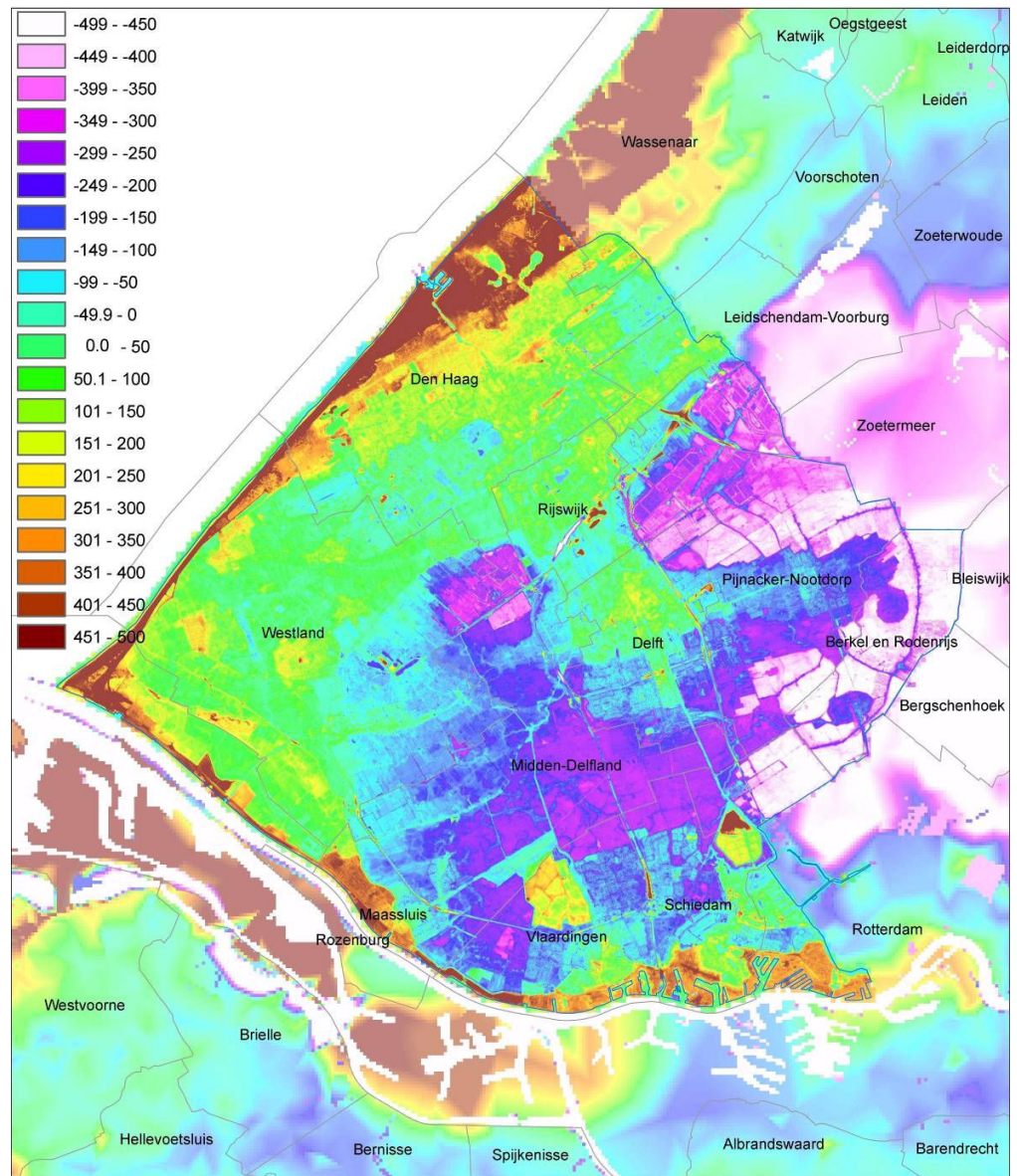
Uiteindelijk willen we in iedere cel een maaiveldhoogte krijgen. Voor alle cellen die als maaiveld zijn gemarkeerd wordt het AHN genomen. Voor de gebieden die als potentieel maaiveld zijn gemarkeerd, wordt vervolgens een waarde bepaald door te interpoleren vanaf locaties die zeker maaiveld zijn. Dit mag maximaal over 10 cellen. Als de verschillen tussen deze geïnterpoleerde waarden en het potentiële maaiveld kleiner zijn dan de grenswaarde van 50 cm [criteria] dan wordt het alsnog als maaiveld aangemerkt (bijv. binnenterreinen van flats). Is het verschil groter dan is het definitief geen maaiveld en wordt de AHN waarde door interpolatie bepaald. Dit gebeurt net zolang tot van alle cellen een maaiveldwaarde bekend is.

#### 7.3.3 *Locale aanpassingen*

Bij het invullen van de ontbrekende maaiveldwaarden kunnen alsnog lokale afwijkingen aan het licht komen doordat onnatuurlijke verhogingen in het maaiveld zijn berekend. Zo is het dakoppervlak van een grote veiling ten onrechte als maaiveld aangeduid, ontstaan onjuiste interpretaties bij viaducten etc. Er is nauwkeurig nagegaan waar dergelijke fouten optreden. Op die plaatsen is handmatig de status van enkele cellen gewijzigd van ‘zeker maaiveld’ in ‘geen maaiveld’ waarna door middel van interpolatie opnieuw een vlakdekkend grid wordt bepaald, nu zonder afwijkende waarden.

#### 7.3.4 *Opschalen maaiveld*

De laatste stap is het opschalen van het maaiveld naar de modelschaal. Hiervoor wordt de mediane waarde bepaald van alle punten die binnen de opgeschaalde cel vallen. Er wordt opgeschaald van 5x5 naar 25x25. Dit betekent dus dat de mediane waarde van 25 cellen wordt bepaald. Het resultaat van het filterproces is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 7.1: Maaiveldhoogtekaart Delfland (o.b.v. AHN) en omgeving (o.b.v. REGIS) [cm t.o.v. NAP]

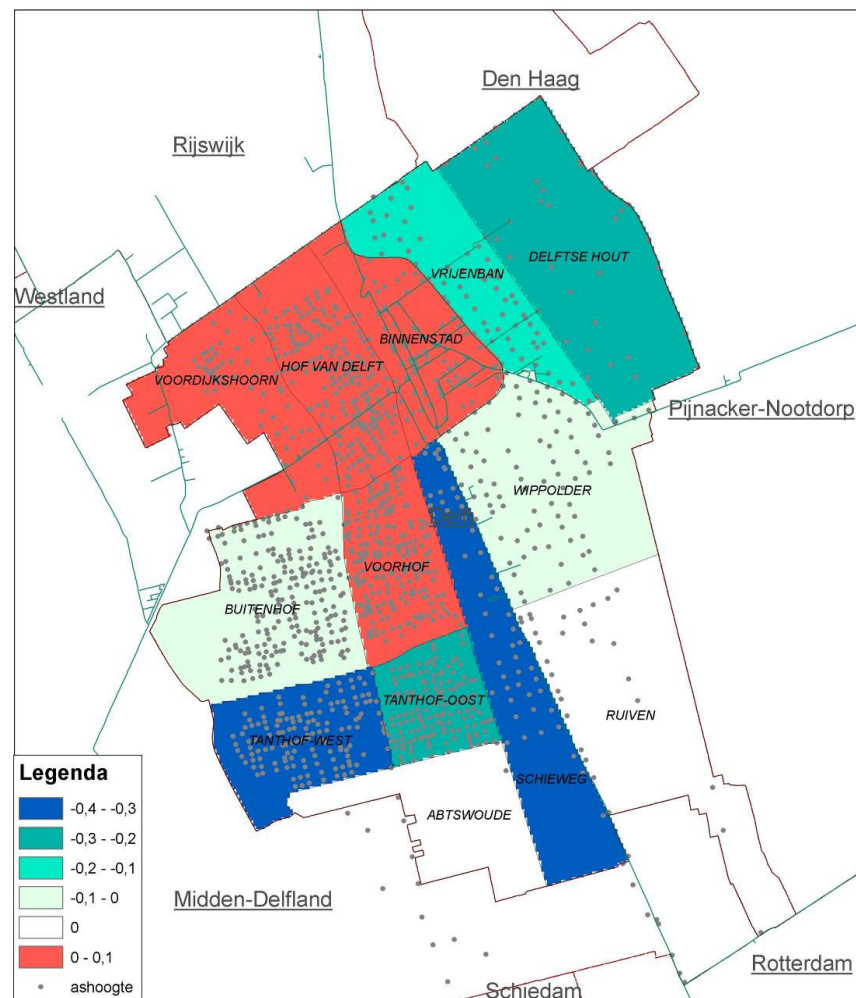
#### 7.4 Corrigeren van stedelijk maaiveld

Tijdens het filterproces is aanvullende informatie beschikbaar gekomen van de gemeente Delft. Het betreft hier een bestand met ashoogten op meer dan 1300 locaties in het stedelijke gebied van Delft. Het gefilterde maaiveld is op die locaties vergeleken met de gemeten ashoogten. Uit die analyse blijkt dat er verschil is tussen beide waarden. Gemiddeld ligt het gefilterde maaiveld 30 cm hoger dan de ashoogte op die locatie. Een dergelijke positieve afwijking lijkt voor stedelijk gebied niet verrassend gezien de grote hoeveelheid ruis zoals geparkeerde auto's, groen en constructies in voor- en achtertuinen etc.

De verwachting is dat dergelijke afwijking representatief is voor gefilterd maaiveld in stedelijk gebied. Op grond van die aanname is besloten om het gefilterde maaiveld ter

plaatse van stedelijk gebied te corrigeren. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen correctie in het stedelijke gebied van Delft en het overige stedelijke gebied.

Voor stedelijk gebied buiten Delft is gecorrigeerd met de gemiddelde afwijking van 30 cm. De correctie van het maaiveld van Delft is niet met deze gemiddelde waarde uitgevoerd maar gedifferentieerd waarbij gebruik gemaakt is van de ruimtelijke spreiding van de meetlocaties van ashoogten. Er is niet per punt gecorrigeerd maar er zijn zogenaamde homogene gebieden gedefinieerd waarvoor het maaiveld met de daar geldende gemiddelde afwijking is gecorrigeerd. Bij de keuze voor homogene gebieden is aansluiting gezocht met de wijkindeling van Delft. De variatie in de correctie die is doorgevoerd voor Delft is te zien in Figuur 7.2.



Figuur 7.2: Correctie maaiveld in Delft op basis van ashooptegegevens

Gedurende het onderzoek is het grondwatermodel overgedragen aan DHV om daarmee in opdracht van de gemeente Delft een GGOR studie voor het stedelijk gebied uit te voeren. Tijdens die studie is gebleken dat het gebruikte ashooptebestand dat voor correctie is gebruikt niet betrouwbaar is. In plaats daarvan heeft de gemeente Delft een nieuw puntenbestand opgeleverd met de hoogteligging van 11.000 *Putdeksels* in plaats van ashooptes.

## 8 Ijking

### 8.1 Achtergrond

Op basis van de initiële parameterisatie is het model zowel stationair als niet-stationair doorgerekend. Dit initiële model is vervolgens geanalyseerd en geijkt. De modelanalyse en ijking is een cyclus die meerdere malen is doorlopen en bestaat uit de volgende onderdelen:

- Modelanalyse;
- Ijking.

### 8.2 Modelanalyse

Tijdens de **modelanalyse** wordt gespeurd naar afwijkingen tussen model en meting (residuen) ten gevolge van ‘fouten’ in de modelinvoer: het verkeerd inschatten van waterpeilen, het ontbreken van onttrekkingen, etc. Dit type ‘fouten’ heeft veel invloed op de modelresultaten en heeft bij verbetering een groter effect dan het ‘finetunen’ van het model door middel van een automatische ijking. Bij het verbeteren van het model is er daarom veel aandacht gegeven aan de verbetering van deze systematische fouten: de modelanalyse.

#### *Analyse op meetpuntniveau – bepalen van residuen*

Tijdens de modelanalyse zijn veelvuldig vergelijkingen gemaakt tussen gemeten en gemodelleerde stijghoogten en grondwaterstanden. Deze zogenaamde ballenkaarten en hun statistieken leveren snel inzicht in de toestand van het model: zijn er nog structurele afwijkingen in bepaalde regio's, zijn ruimtelijke verbanden zichtbaar, hoe groot zijn de afwijkingen gemiddeld, etc.

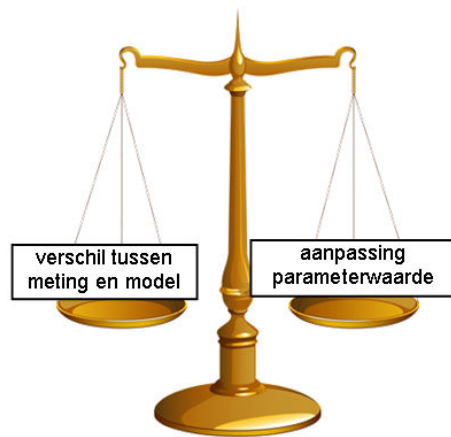
### 8.3 Ijking

Tijdens de ijking wordt met behulp van automatische ijkingsoftware getracht het model verder te verbeteren door modelparameters aan te passen op basis van beschikbare metingen. Er ontstaat een balans tussen:

- de grootte van de afwijkingen tussen metingen en modelsimulatie en
- de parameteraanpassingen die gedaan zijn om dit te bereiken.

Ijking initieert een dilemma, omdat we niet weten wanneer de balans echt in evenwicht is. Afwijkingen tussen model en meting (zogenaamde residuen) kunnen ontstaan doordat:

- de initiële modelparameters afwijken van de werkelijkheid, maar ook doordat;
- het initiële model nog steeds onvolkomenheden bevat en/of hiaten in de gehanteerde modelconcepten.



Figuur 8.1: Ijkingsbalans

De modelanalyse- en ijkingscyclus wordt daarom meerdere malen doorlopen om beide foutenbronnen te kunnen minimaliseren.

In een perfecte wereld (lees: model = werkelijkheid) zullen residuen en parameteraanpassingen beide nul zijn. Helaas is dit nooit het geval: we kennen de werkelijkheid nooit volledig. Tijdens de ijking moeten we daarom keuzes maken:

- Hoeveel gewicht hangen we aan de metingen? Ofwel hoe goed zijn onze metingen? Kennen deze grote meetfouten etc.?
- Hoeveel gewicht hangen we aan onze eigen kennis over de initiële modelparameters?
- Hoe vertalen we gebiedskennis naar objectieve invoer?
- Welke model parameters willen we aanpassen?
- etc.etc. ...

IJking is daarmee het zoeken naar een balans tussen **vertrouwen** in metingen en **vertrouwen** in initiële modelparameterwaarden.

### 8.3.1 IJkset

Voor de ijking (stationair en niet-stationair) zijn zo veel mogelijk betrouwbare meetreeksen ingewonnen. Betrouwbaar wil hier zeggen dat de meetreeksen ruimtelijk en temporeel passen bij het modelgebied en de modelperiode. Hiertoe is uit de DINO database (Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond) en de door diverse partijen aangeleverde datasets een selectie gemaakt van meetlocaties die een temporeel en ruimtelijk representatieve schatting leveren van de gemiddelde grondwaterstand in de stationaire periode 1994-2004. Deze selectie is gemaakt op basis van een aantal criteria:

- Meetreeks moet metingen bevatten binnen de stationaire periode 1994-2004;
- Om een representatieve schatting van de gemiddelde grondwaterstand c.q. stijghoogte te verkrijgen dient er tenminste in de helft van de stationaire periode gemeten te zijn. Is dit niet het geval, dan kan de betreffende locatie niet gebruikt worden voor de ijking van het stationaire grondwatermodel;
- Het meetfilter moet aan een modellaag toegekend kunnen worden;
- Tijdens de ijking worden berekende stijghoogten vergeleken met metingen. De metingen moeten daarom toegekend worden aan modellen. Dit gebeurt op basis van beschikbare filterdieptes en de laagindeling zoals in het model is gebruikt. Hierbij worden filters aan een laag toegekend, indien tenminste het hart van het filter in een watervoerend pakket ligt;



- De meetlocatie moet minimaal 100m vanaf een onttrekking liggen;
- Het model rekent met een grid van 25 bij 25 m. Dit betekent dat er rond onttrekkingen niet exact een pompkegel gemodelleerd wordt. Dicht bij onttrekkingen (straal van 100 m) zal het model dus numerieke afwijkingen geven ten opzichte van de metingen. Om te voorkomen dat deze metingen onterecht aanpassingen in ondergrondparameters veroorzaken, worden deze meetlocaties niet meegenomen tijdens de ijking;
- De meetlocatie moet minimaal 25m vanaf een waterloop liggen;
- Wanneer een meting in dezelfde cel ligt als een waterloop dan is het model in deze cel nauwelijks gevoelig voor de te ijken parameters. Deze meetlocaties worden daarom niet gebruikt worden tijdens ijking;
- De meetreeks dient van goede kwaliteit te zijn. Daarom wordt automatisch uitgebreide tijdreeksanalyse gedaan. Verdachte metingen worden visueel beoordeeld;
- Een meetreeks is kwalitatief goed als:
  - geen grote uitbijters aanwezig zijn;
  - geen grote sprongen in zitten;
  - geen extreme variatie in de dynamiek zit.

Er zijn na de standaard selectieprocedure 1003 meetreeksen over gebleven waarmee het ijkingsproces is gestart. Gedurende een aantal ijkstappen zijn nog enkele reeksen komen te vervallen, o.a. meetpunten aan de randen van het model.

Uiteindelijk zijn 839 reeksen overgebleven waarvan er 84 in de deklaag rond Delft zijn gelegen, 191 in de deklaag van Den Haag, 32 in de deklaag van Leidschendam en de overige DINO-metingen (532) die verspreid zijn over alle lagen in het gehele ijkgebied. In Tabel 8.1 is het aantal metingen per laag gespecificeerd.

Tabel 8.1: Aantal metingen gebruikt voor ijking per laag

Modellaag	Aantal metingen	Modellaag	Aantal metingen
1	149	12	12
2	263	14	10
3	73	16	35
4	31	18	19
6	1	20	3
8	113	22	14
10	115	24	1

### 8.3.2 Stationaire ijking

De stationaire ijking is uitgevoerd voor alle ondergrondparameters (kD- en c-waarden) met de Representer methode. De Representer methode zorgt voor een optimale afweging tussen het geven van ruimte aan parameteraanpassing en het toestaan van residuen (zie verder hoofdstuk 8.5 voor meer toelichting). Vanwege de lange rekentijden is het grondwatermodel opgeschaald voor ijking naar een gridgrootte van 250x250 m. De ijkingsresultaten, in de vorm van aanpassingsvelden op deze grove schaal, zijn na ijking neergeschaald naar 25x25 m en vermenigvuldigd met de initiële parameterbeelden, waardoor lokale details behouden blijven.

In totaal is de Representer ijking zo'n 10 keer uitgevoerd tot het eindresultaat bereikt was. Tussen deze ijkingsronden door is het uitgangsmodel telkens verbeterd door modelanalyse en is regelmatig de weging tussen parameteraanpassing en toegelaten residuen aangepast.

### Aanpassingen tijdens de ijking aan model en ijkingsparameters

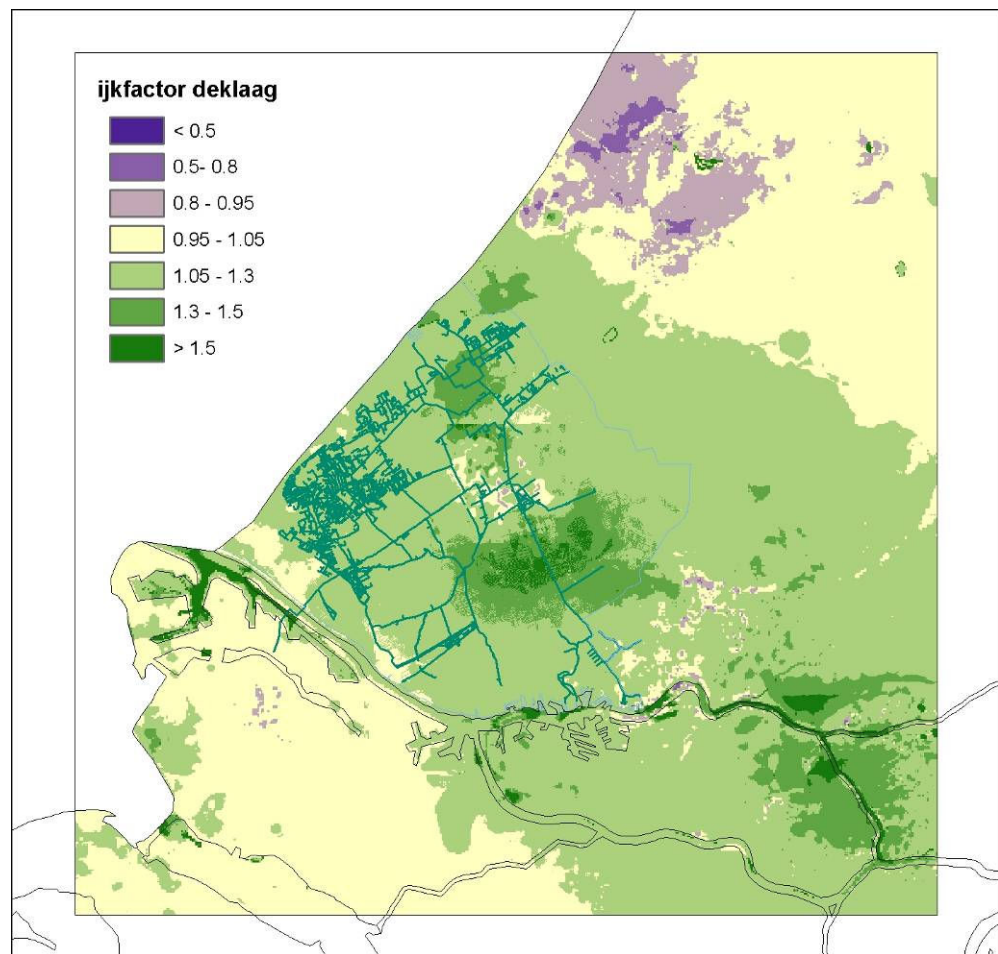
De verbeteringen die tijdens de ijking en modelanalyse en ijking naar voren kwamen waren de volgende:

- Uit de ijkinganalyse kwam naar voren dat aanpassing van de modelparameters (transmissiviteit en weerstand) erg gestuurd werd door een groot aantal metingen aan de zuidelijke rand van het model buiten Delfland. Hierdoor werden in Delfland onterechte aanpassingen aan KD en C-waarden gedaan. Daarom is gekozen om metingen buiten Delfland een grotere afwijking van de meetwaarde toe te staan (hogere variantie) dan metingen binnen Delfland. Dit is uitgevoerd door in de ijking metingen buiten Delfland een 10 x hogere variantie mee te geven dan metingen binnen Delfland;
- Binnen de Representer wordt een bandbreedte opgeven waarbinnen deze aanpassingen aan de kd- en c- waarden mag toestaan. Hierbij bepaalt de 'Range' over welke afstand de parameters in gridcellen mee moet veranderen met een aanpassing in een nabij gelegen gridcel (een correlatielengte). De range is tijdens de ijking diverse malen aangepast. Tenslotte is gekozen voor een range van 5 km. Tevens moet binnen de Representer een aanpassingswaarde waarmee de parameters maximaal mogen veranderen worden ingesteld. De aanpassingswaarde geeft weer hoeveel vertrouwen je in de initiële parameter waarden hebt en hoeveel waarde je aan de metingen hecht. Wanneer je bijvoorbeeld een erg grote aanpassingsfactor instelt, betekent dit dat je veel meer vertrouwen in de metingen dan in je initiële kd – en c-waarden hebt. De aanpassingswaarde is regelmatig aangepast en tenslotte gekozen voor een maximale aanpassingswaarde van 2;
- Uit de ijking bleek dat er grote afwijkingen waren tussen grondwaterstanden en metingen in de deklaag. Het topsysteem is daarom goed bekeken en het kwam naar voren dat de waterlopen, die alleen in modellaag 1 van het grondwatermodel zijn geschematiseerd, ook vaak modellaag 2 en 3 van het grondwatermodel snijden. Daarom is gekozen om de weerstand van modellagen die de waterlopen doorsnijden zodanig te verlagen dat de betreffende modellaag direct in verbinding staat met de waterloop;
- Uit de modelanalyse bleek dat de waterstanden veel te hoog gemodelleerd waren in stedelijk gebied. Deze hoge grondwaterstanden kwamen onder andere doordat in stedelijk gebied geen drainage in het grondwatermodel was gedaan, omdat hierover geen gegevens bekend waren. Door ervaring van grondwatermodellering in andere stedelijke gebieden is gekozen om de drainage in de stad aan te leggen op 1m.-mv. Zie hoofdstuk drainage voor meer informatie;
- Op basis van de te hoge stijghoogten in het veenweide gebied ten oosten van Delfland, bleek dat de stijghoogte uit het PZH model, die als randvoorwaarde op modellaag 1 in het grondwatermodel is geplaatst, te hoog was. Op basis van het polderpeilvakkenbestand dat in een eerder studie voor Zuid-Holland is aangemaakt, zijn nieuwe grondwaterstanden aan modellaag 1 toegekend;
- Het grondwatermodel produceerde in sommige gebieden grondwaterstanden boven maaiveld. Na modelanalyse bleek dat dit vooral bij grote watervlakken zoals bijvoorbeeld Delftse Hout het geval was. De watervlakken waren slechts door een lijnelement geschematiseerd in het grondwatermodel, terwijl het in werkelijkheid een vlak moest zijn. De watervlakken zijn alsnog aan het grondwatermodel toegevoegd.

## 8.4 Resultaten van de stationaire ijking

De resultaten van de stationaire ijking zijn in deze paragraaf gepresenteerd in de vorm van statistieken en visueel in de vorm van 'ballenkaarten'. Om zichtbaar te maken

welke aanpassingen de ijking heeft gedaan is Figuur 8.2 toegevoegd. Daarin is te zien met welke factor de weerstand van de gehele deklaag is aangepast.



Figuur 8.2: Gemiddelde ijkfactor voor de totale weerstand van de Holocene deklaag

#### 8.4.1 Statistieken

In Tabel 8.2 zijn de stationaire ijkingresultaten in de vorm van statistieken van de residuen op de meetlocaties die binnen het Delfland waterschap vallen, samengevat. De residuen zijn berekend als modelwaarde minus gemiddelde gemeten waarde ten opzichte van NAP. Dit betekent dat bij positieve waarden het model hogere ('nattere') waarden geeft dan de metingen en bij negatieve waarden juist dat het model lagere ('drogere') waarden geeft dan de metingen.

De statistieken laten zien dat het model geen structurele afwijking heeft voor de deklaag en het eerste watervoerend pakket voor metingen binnen Delfland (grotendeels te laag of te hoog; grotendeels blauwe of rode ballen). De gemiddelde afwijking tussen model en meting is voor de deklaag immers 1 cm en voor het eerste watervoerend pakket 11 cm. In het tweede en derde watervoerend pakket zitten weinig metingen (respectievelijk 4 en 0) en daarom worden deze pakketten buiten beschouwing gelaten. In de tabel zijn naast de werkelijke residuen ook de statistieken van de absolute residuen weergegeven. De kolommen 25%, 50% en 75% geven de zogenaamde percentielwaarden weer van deze absolute residuen.

Tabel 8.2 laat zien dat 25% van de absolute afwijkingen tussen model en meting kleiner is dan 12 cm, 50% van de absolute afwijkingen tussen model en meting kleiner is dan 24 cm en 75% van de absolute afwijkingen tussen model en meting kleiner is dan 43 cm.

Tabel 8.2: Resultaat stationaire ijking, statistieken van residuen in [m]. (afwijking = model – meting; negatief = model droger dan werkelijkheid; positief = model natter dan werkelijkheid)

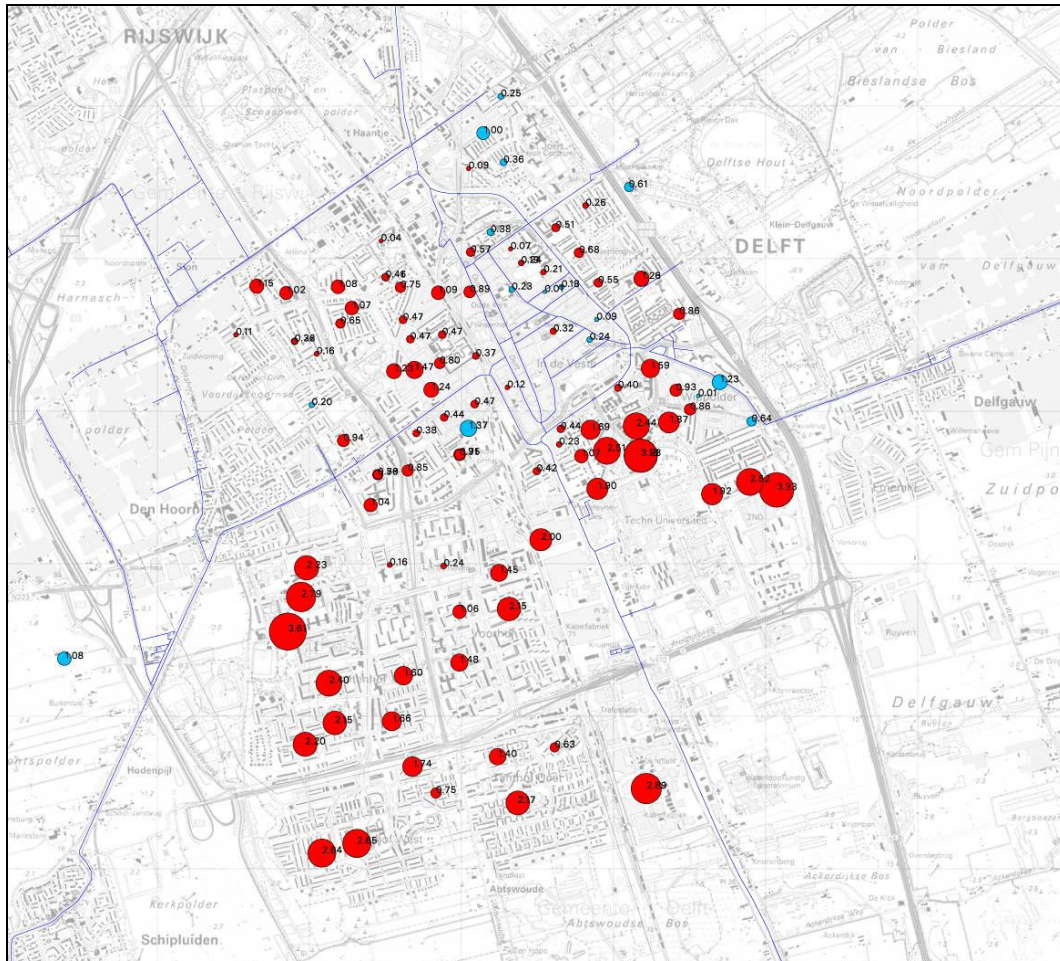
Pakket	Statistieken van residuen			
	Aantal	minimum	maximum	gemiddelde
Deklaag	503	-2.25	1.69	0.01
Eerste watervoerend pakket	40	-2.86	1.01	0.11
Tweede watervoerend pakket	4	0.35	0.68	0.48
Derde watervoerend pakket	0	0.00	0.00	0

Pakket	Statistieken van absolute residuen			
	gemiddelde	25%	50%	75%
Deklaag	0.32	0.12	0.24	0.43
Eerste watervoerend pakket	0.24	0.06	0.15	0.36
Tweede watervoerend pakket	0.48	0.22	0.31	0.35
Derde watervoerend pakket	0	0	0	0

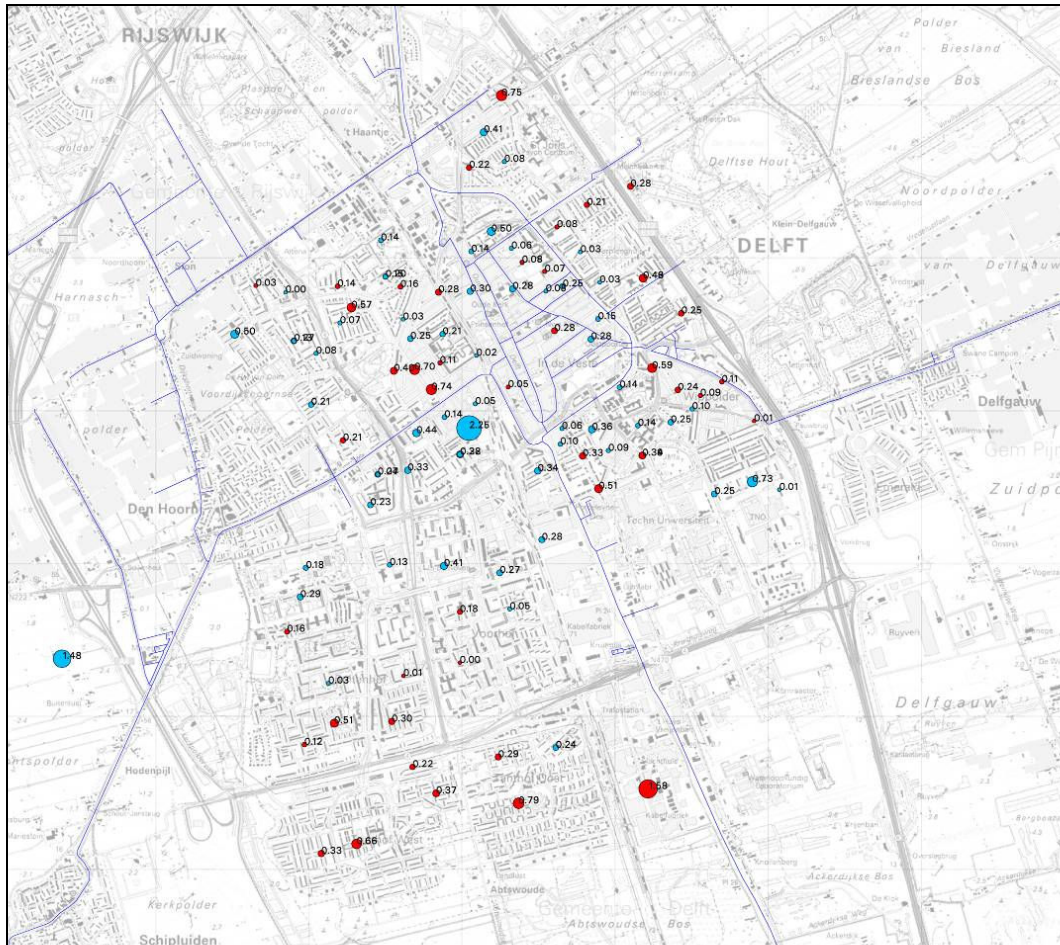
#### 8.4.2 Ballenkaarten

Er zijn ook zogenaamde ‘ballenkaarten’ gemaakt. Deze kaarten geven met behulp van rode en blauwe ballen de verschillen tussen gemodelleerde stijghoogte van het 25m-grondwatermodel en gemeten stijghoogte in meters weer. Wanneer een bal rood is gekleurd, betekent het dat de stijghoogte die het model berekent hoger is dan de meting. Wanneer een bal blauw gekleurd is, betekent het dat het model een lagere stijghoogte simuleert dan de gemeten stijghoogte. Aan de grootte van de ballen is snel te zien waar de afwijkingen tussen model en meting groot/klein zijn.

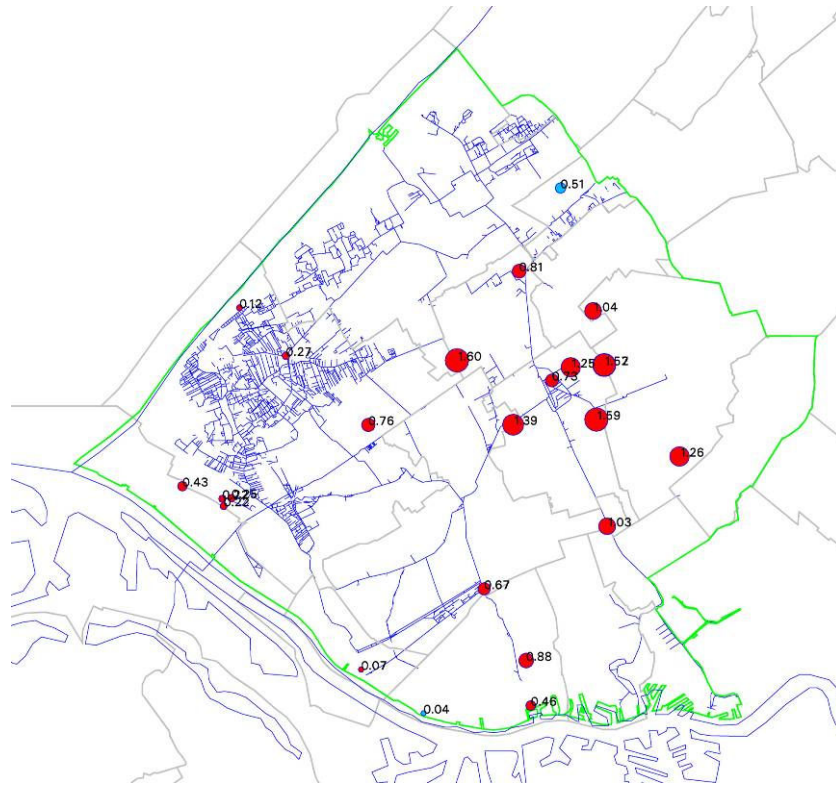
Zowel voor als na de ijking zijn ballenkaarten gemaakt van de grondwaterstanden in Delft en van de stijghoogten in het eerste watervoerende pakket. Zie Figuur 8.7 t/m Figuur 8.6. Duidelijk is te zien dat na de ijking de ballen kleiner zijn geworden. Met name in de deklaag in Delft zijn de stijghoogte residuen na de ijking erg klein geworden.



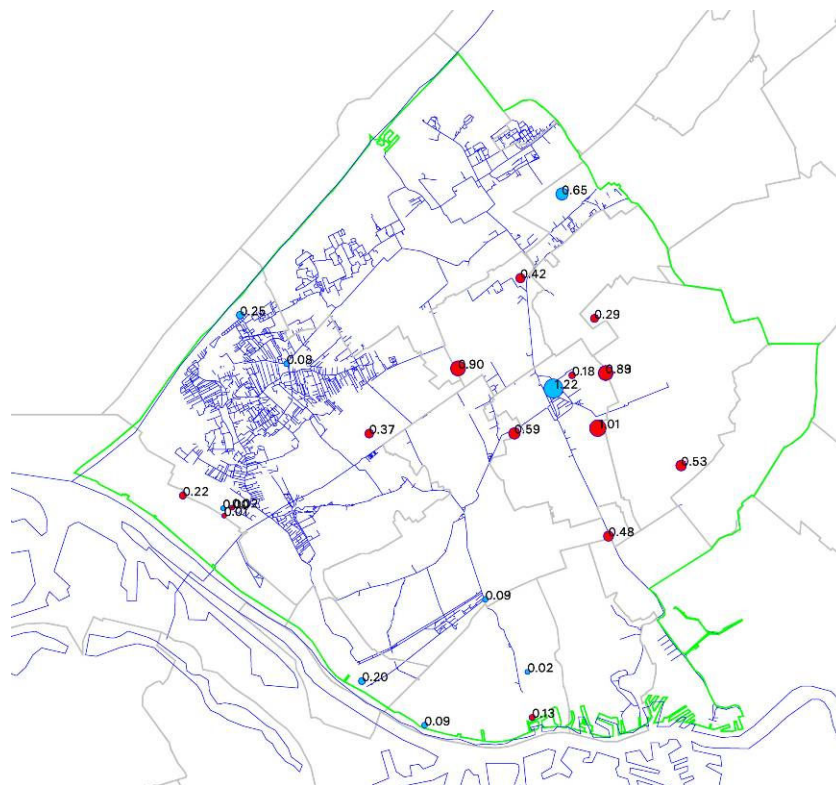
Figuur 8.3: Residuen grondwaterstand in Delft voor ijking



Figuur 8.4: Residuen grondwaterstand in Delft na ijking

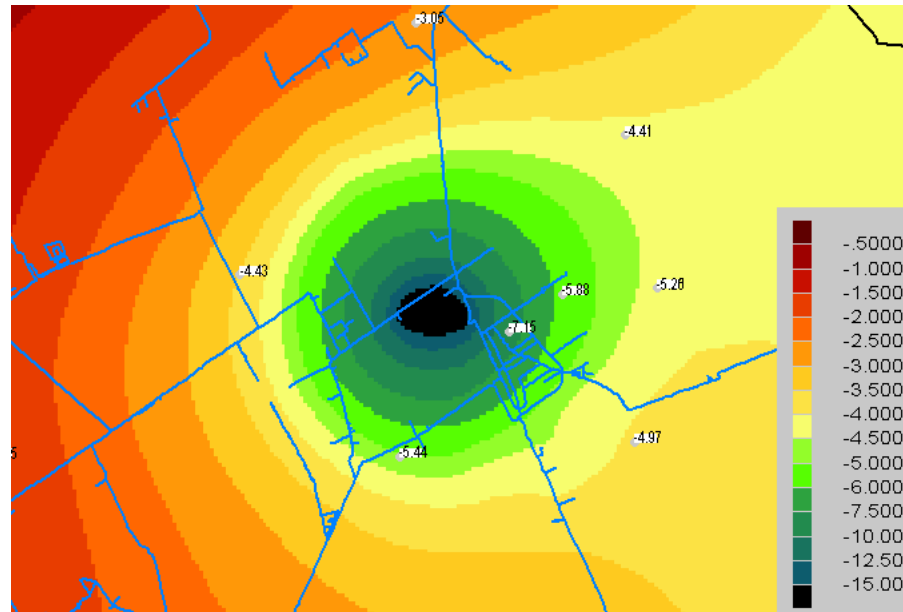


Figuur 8.5: Residuen stijghoogten in het eerste watervoerende pakket voor ijking



Figuur 8.6: Residuen stijghoogten in het eerste watervoerende pakket na ijking

In het eerste watervoerend pakket zijn ter plaatse van de winning nog wel grote afwijkingen tussen model en meting (zie Figuur 8.6). De oorzaak dat de ballen na de ijking nog steeds afwijkingen vertonen kan zijn dat deze metingen precies in de onttrekkingskegel van de winning liggen. Dit is te zien in Figuur 8.7 waarin de stijghoogten van het eerste watervoerend pakket van het 25m-grondwatermodel zijn geplott met de metingen. Je ziet in deze figuur dat de stijghoogteverschillen op korte afstand van elkaar erg groot zijn binnen de kegel. Aangezien metingen puntwaarden zijn, is het erg moeilijk om met gemiddelde stijghoogten binnen een 250 m. gridcel van het grondwatermodel een puntwaarde ergens in die 250m gridcel te benaderen.



Figuur 8.7: Stijghoogten van de onttrekkingskegel berekend met het 25m grondwatermodel na ijking

#### 8.4.3 Waterbalans

Er is geprobeerd voor een aantal polders op basis van de waterbalans na te gaan of de modelresultaten overeenkomen, en dan met name de flux richting of vanuit het oppervlaktewater. Delfland heeft tabellen beschikbaar gesteld waarin balansen voor het oppervlaktewatersysteem zijn weergegeven voor onder ander de polders Holierhoek/Zouteveense polder, polder Berkel en polder Nootdorp. Deze balansen voor het oppervlaktewater zijn niet geschikt gebleken om eenduidig vast te stellen wat de jaargemiddelde flux vanuit het grondwater is. De opzet van de balansen is niet uniform en de grondwaterbijdrage is niet eenduidig vast te stellen.

De afvoer door het topstysteem kan ook worden vergeleken met de totale hoeveelheid oppervlaktewater die door Delfland wordt uitgemaal. Voor 1998 en 1999 zijn die gegevens bekeken. Daaruit blijkt dat in 1998 in totaal 82 miljoen m<sup>3</sup> (0,57 mm/dag) is uitgemaal tegen 76 miljoen m<sup>3</sup> (0,52 mm/dag) in 1999. Wanneer de totale afvoer voor alle waterlopen in het model (RIV en DRN) wordt bepaald komt dit neer op 0,55 mm/dag en voldoet daarmee aan de orde van grootte uit de gemaalbalansen.



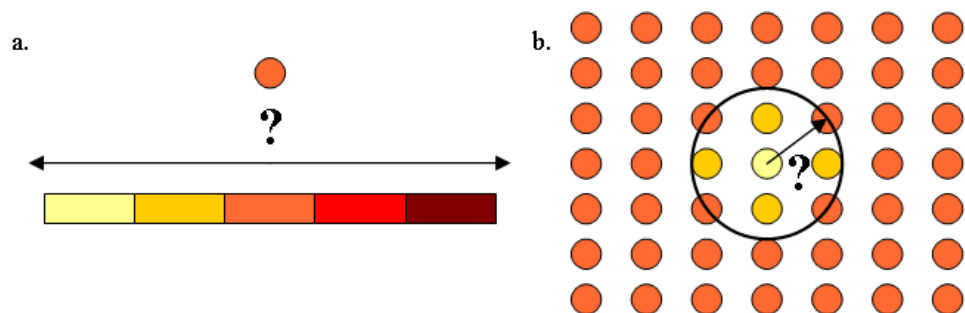
## 8.5 De Representermethode

Voor de stationaire ijking is gebruik gemaakt van de Representer methode. De kD- en c-waarden van alle modellen zijn met deze methode geoptimaliseerd op basis van de gemiddelde grondwaterstanden en stijghoogten in de geselecteerde meetreeksen. In verband met de lange rekentijden is voor de stationaire ijking opgeschaald naar 250x250 m. Aanpassingsfactoren zijn op deze schaal bepaald en worden op de fijne schaal vermenigvuldigd met de initiële kD- en c-waarden waardoor lokale variaties behouden blijven.

Representers zijn functies die de relatie tussen de ruimtelijke variatie van modelparameters en individuele metingen beschrijven (Valstar, 2001). Het voordeel van de Representer Methode is dat geen zones met een gelijke parameterwaarde gedefinieerd hoeven te worden en dat de in de stijghoogtemetingen aanwezige informatie over parameterwaarden optimaal benut wordt. Dit is de kracht van de Representer methode: op een zeer slimme manier de gevoeligheid tussen parameters en metingen vertalen in een optimale ‘zoning’ en op basis hiervan de parameterwaarden aanpassen.

De mate van aanpassing hangt af van keuzen van de modelleur. De kwaliteit van het gekozen model hangt net als bij willekeurige andere ijkmethoden af van de kwaliteit van het uitgangsmodel en de hoeveelheid en de kwaliteit van de metingen. Wel ‘kijkt’ de representer methode genuanceerder dan enig andere (automatische) methode, zodat de kwaliteit van de metingen optimaal wordt benut en wat misschien wel belangrijker is, is dat het ontbreken van kwaliteit van het uitgangsmodel eerder wordt afgestraft en de methodiek de modelleur op deze wijze beter signaleert dat het concept en niet de parameters moeten worden verbeterd.

De bandbreedten bestaan uit de zogenaamde aanpassingsruimte van de parameters, verdeelt in twee typen: ‘sill’ en ‘range’ (Figuur 8.8). De ‘Sill’ bepaalt hoe ver een parameterwaarde mag afwijken van zijn initiële waarde (een variantie). In principe geeft de sill aan hoe veel geloof er aan de initiële waarde wordt gehecht. De ‘Range’ bepaalt over welke afstand de parameters in gridcellen mee moeten veranderen met een aanpassing in een nabij gelegen gridcel (een correlatielengte). De range bepaalt hoeveel ruimtelijke samenhang er is in het parameterveld: uniforme pakketten hebben een veel grotere ruimtelijke samenhang dan rommelig afgezette pakketten.

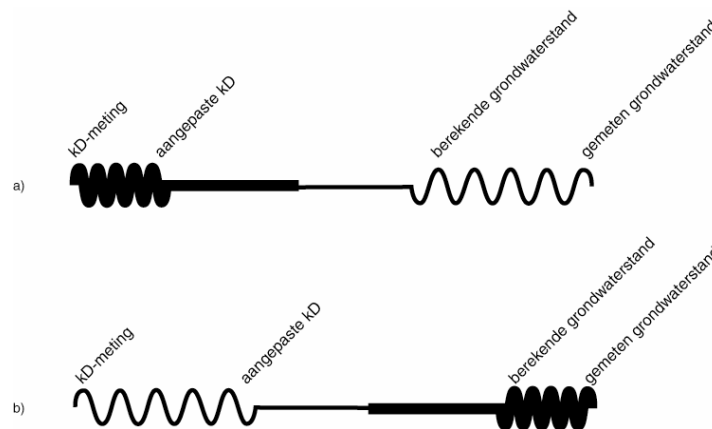


Figuur 8.8: Schematische weergave van de aanpassingsruimte van parameterwaarden: a. sill en b. range.

Naast de aanpassingsruimte van de te ijken parameters moet er voor de ijking ook een afwijkingsruimte bepaald worden voor de metingen. De afwijkingsruimte geeft aan hoe dicht een meting benaderd moet worden tijdens de ijking. Deze afwijkingsruimte hangt af van de variatie binnen de gemeten tijdreeksen: sterk variërende reeksen krijgen een

grote afwijkingsruimte, heel vlakke tijdreeksen daarentegen krijgen een heel kleine afwijkingsruimte toebedeeld.

De afwijkingsruimte van de metingen en de aanpassingsruimte van de parameters zijn concurrerende krachten tijdens de ijking. Hele kleine residuen kun je bereiken door de toe te laten afwijkingsruimte heel klein te maken, maar dat betekent dat er mogelijk grote veranderingen van de parameters (grote aanpassingsruimte) nodig zijn. Dit geldt ook omgekeerd. In Figuur 8.9 is getracht de werking van de balans tussen afwijkingsruimte en aanpassingsruimte weer te geven in de vorm van twee concurrerende veren.



Figuur 8.9: Visualisatie van de balans tussen de aanpassingsruimte van een kD-waarde en de afwijkingsruimte van een grondwaterstandmeting; a. kleine aanpassingsruimte voor kD-waarde; b. kleine afwijkingsruimte voor grondwaterstandmeting.

IJken met de Representer methode werkt iteratief. De Representer software zorgt voor de parameteraanpassing, maar geeft door middel van vreemde voorgestelde aanpassingen ook inzicht in verbeterpunten van het modelconcept. Modelanalyse wisselt de ijking met de Representer methode dan ook af. Tijdens de modelanalyseronden werd het model getoetst op afwijkingen in berekende gemiddelde grondwaterstanden/stijghoogten

## 8.6 Niet stationaire ijking

### 8.6.1 Ijkmethode

Tijdens de ijking van het niet-stationaire model zijn er grofweg twee ‘knoppen’ waaraan gedraaid kan worden te weten de **drainageweerstand van de waterlopen** en de modellering van de **onverzadigde zone**. De meest onzekere parameter binnen het CAPSIM model is de freatische bergingscoëfficiënt.

Tijdens de niet-stationaire ijking zijn deze twee typen parameters met PEST (model onafhankelijke procedure voor parameter optimalisatie) geoptimaliseerd op gemeten dynamiek en gemeten gemiddelde grondwaterstanden. De ijking is gezoneerd uitgevoerd:

- Voor de freatische bergingscoëfficiënt zijn 6 zogenaamde bodemzones gebruikt. Die zones zijn ontstaan door samenvoeging van gelijksoortige bodemfysische eenheden waarvan er standaard 22 zijn gedefinieerd;
- Voor de drainageweerstand zijn de waterlopen opgedeeld in 6 verschillende categorieën. Vier daarvan zijn de weerstanden van de zogenaamde RIV-elementen, te weten boezemwaterlopen, polderwaterlopen, watervlakken en waterlopen in de duinen. De overige twee parameters zijn de drainageweerstanden van de landelijke en de stedelijke drainage.

In totaal zijn er dus 2 verschillende parameters waarmee het niet-stationaire model is geijkt. Voor beide parameters zijn aanpassingsfactoren bepaald die als randvoorwaarden met de ijking worden meegegeven. Voor de freatische bergingscoëfficiënt is door Alterra een onder- en bovengrens voor de aanpassing aangegeven, respectievelijk een factor 0,5 en 2,0. De weerstand van de waterloopbodem heeft een aanpassingsfactor tussen 0,2 en 5,0 meegekregen. Door een bandbreedte op te geven die ook niet te groot is wordt voorkomen dat tijdens de ijking parameteraanpassingen worden gedaan die onrealistisch hoog zijn om fouten in het modelconcept te compenseren.

Tijdens de ijking wordt geëvalueerd op het absolute verschil in totale dynamiek tussen modeltijdreeks en metingtijdreeks. Hoe meer de dynamiek van beide reeksen overeen komt hoe lager het absolute verschil zal zijn. Daarvoor wordt per tijdstap bepaald wat het verschil is tussen (1) de meting op dat tijdstip en het gemiddelde van de meetreeks en (2) de berekende waarde en het gemiddelde van de berekende reeks.

Voor de niet-stationaire ijking is het DSM model opgeschaald naar een gridgrootte van 250x250 m en is een periode van acht jaar gebruikt, namelijk 1997-2004 (2922 tijdstappen).

#### 8.6.2 *IJkset*

Ten behoeve van de stationaire ijking is een selectie gemaakt van het aantal beschikbare en bruikbare reeksen. Uiteindelijk is geijkt met 839 meetreeksen. Voor de niet stationaire ijking is een extra voorwaarde aan de meetpunten gesteld namelijk dat de meetpunten binnen de grenzen van Delfland liggen. Reden hiervoor is dat buiten Delfland het model een vaste bovenrand heeft meegekregen in de vorm van een polderpeil waardoor er geen dynamiek veroorzaakt wordt door neerslag en verdamping, dat is slechts mogelijk binnen Delfland. Daarmee komt het aantal bruikbare meetreeksen op 712.

#### 8.6.3 *Resultaten van de ijking*

Tijdens de ijking variëren de aanpassingsfactoren van de 12 parameters. Na vier iteratiestappen is de variatie in de aanpassingsfactoren gering. De hoogte van de verschillende aanpassingsfactoren na ijking staan vermeld in Tabel 8.3.

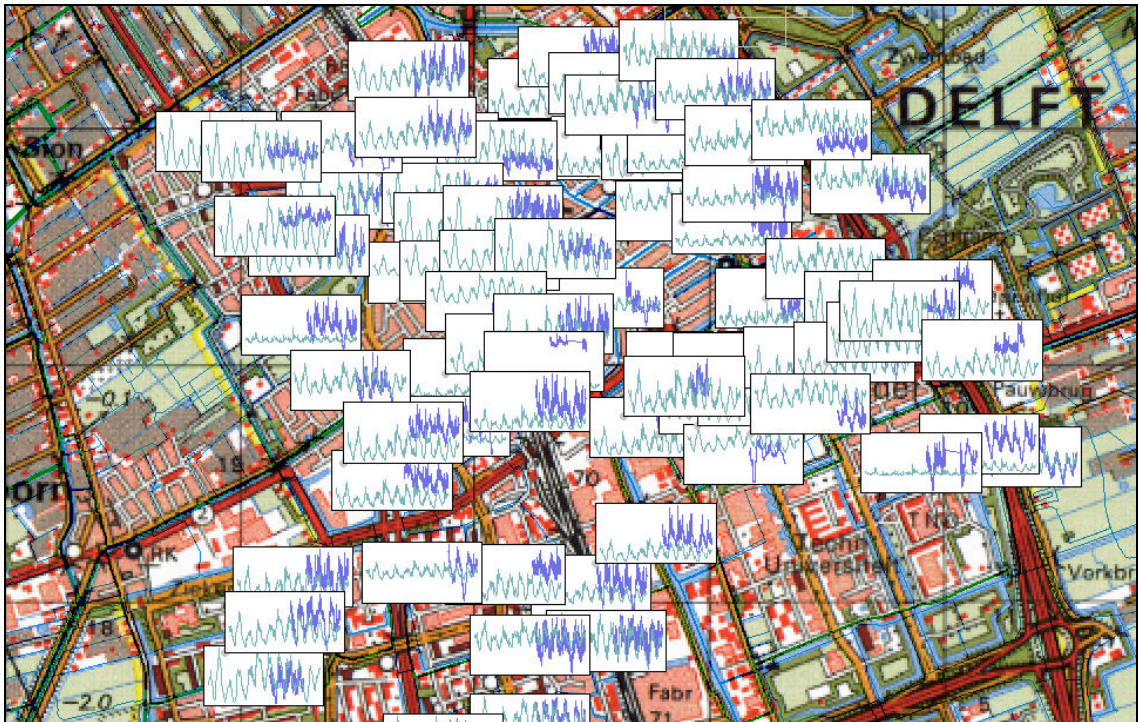
Tabel 8.3: Aanpassingsfactoren na niet-stationaire ijking

Parameter	Ijkfactor
<i>Bergingscoëfficiënt onverzadigde zone</i>	
Zone 1	1,00
Zone 2	1,00
Zone 3	0,98
Zone 4	0,98
Zone 5	0,98
Zone 6	0,98
<i>Drainageweerstand waterlopen</i>	
Boezem	0,8
Polder	2,0
Duinen	0,9
Watervlakken	0,9
<i>Drainageweerstand drainage</i>	
landelijke drainage	0,9
stedelijke drainage	0,9

Al vrij snel tijdens de ijking wordt duidelijk welke coëfficiënten relatief gevoelig zijn en welke niet. Zo heeft de ijking geen aanpassingen gedaan aan de “bergingscoëfficiënt van de onverzadigde zone”. Ondanks wat pogingen blijven de aanpassingsfactoren eigenlijk ongewijzigd op 1,0 staan.

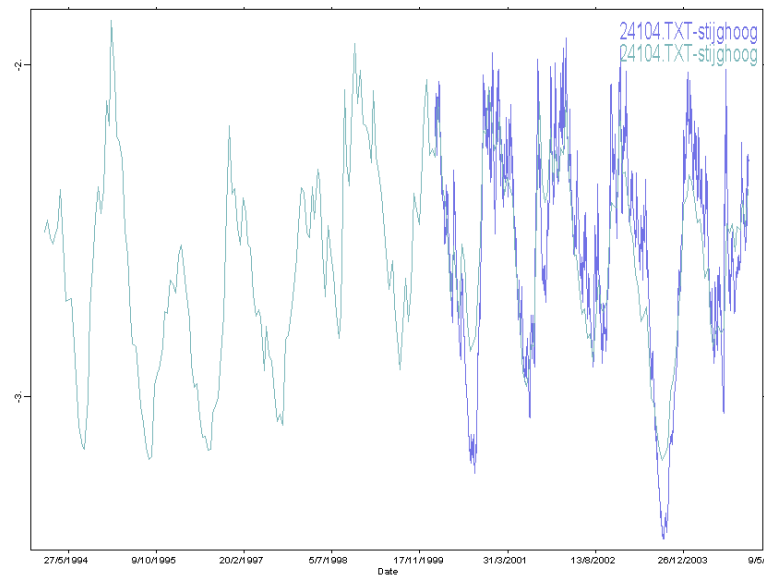
De ijking ziet het meeste effect in het aanpassen van de weerstand van de boezem- en polderwaterlopen. De weerstand van de boezem wordt naar beneden bijgesteld. Niet met de maximale aanpassingsruimte maar beperkt. Voor de weerstand van de polderwaterlopen geldt het omgekeerde. De weerstand moet blijkbaar omhoog zonder van de volledige aanpassingsruimte gebruik te maken. Deze verhoging van de weerstand wijst erop dat grondwaterstand minder aan de polderwaterlopen hangt en daardoor meer dynamiek zal vertonen.

Op basis van de nieuwe parameterwaarden is het niet-stationaire model vervolgens doorgerekend. De berekende reeksen zijn vervolgens naast de gemeten reeksen gelegd en geanalyseerd. Zonder de details te willen tonen geeft Figuur 8.10 een indruk hoe de gemeten en berekende tijdreeksen gezamenlijk getoond kunnen worden, in dit geval voor het centrumgebied van Delft.



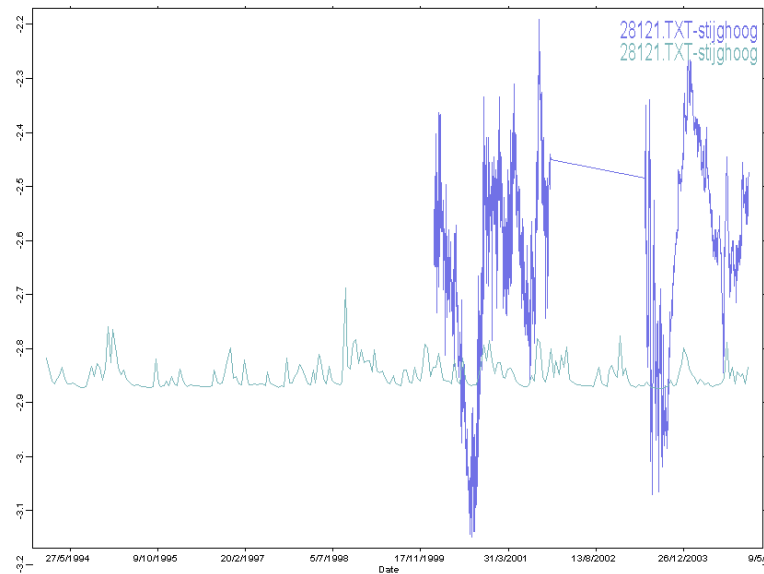
Figuur 8.10: Globaal overzicht gemeten (blauw) en berekende (groen) grondwaterreeksen voor centrum Delft

In de figuur zijn wel de verschillen te zien tussen de uitkomsten per meetlocatie. Niet overal is de fit van beide reeksen gelijk. Op de meeste locaties komt de dynamiek tussen beide reeksen overeen (Figuur 8.11), op enkele locaties vertoont de meetreeks een duidelijk hogere dynamiek (Figuur 8.12).



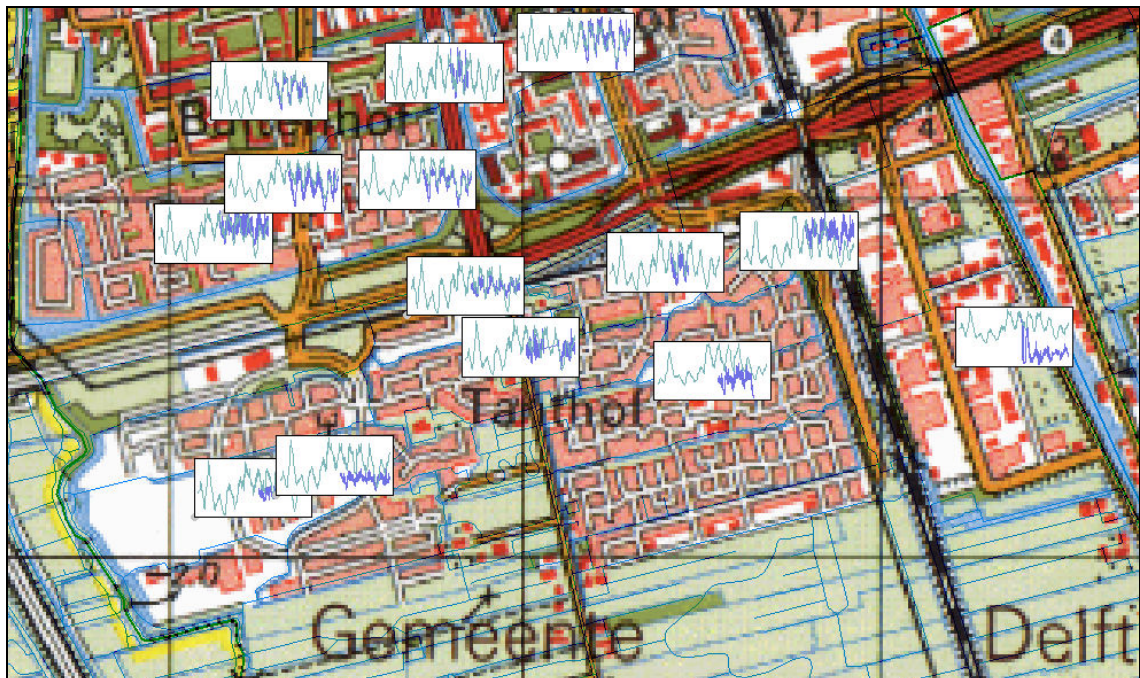
Figuur 8.11: Gemeten (blauw) en berekende (groen) grondwaterreeksen voor locatie 24.104

Vanuit de stationaire ijking werd zichtbaar dat de gemiddelde meet- en modelwaarden kunnen afwijken. Ook dat is te zien wanneer tijdreeksen wel de juiste dynamiek vertonen maar op een afwijkende gemiddelde waarde.



Figuur 8.12: Gemeten (blauw) en berekende (groen) grondwaterreeksen voor locatie 28.121

Figuur 8.13 laat de meet- en modelreeksen zien voor de wijk Tanthof in het zuiden van Delft. Over het algemeen starten de meetreeksen voor Delft rond het jaar 2000. De groene lijn in de figuur is het verloop van de berekende waarden waarvan het begin ligt bij 1994. Gemiddeld genomen komen de modelresultaten vrij goed overeen met de gemeten waarden.



Figuur 8.13: Overzicht gemeten en berekende grondwaterreeksen voor Delft-Tanthof

#### 8.6.4 Verbeteringen van het model

Gedurende de totstandkoming van het stoftransportmodel is een conceptfout aan het licht gekomen die specifiek tot problemen leidde in het stoftransportmodel. Gezien de

bepaalde invloed op grondwaterstanden heeft het geen effect op de ijking. Het gaat om het ten onrechte ontstaan van kortsluitstroming tussen de boezem en de polderwaterloop in de directe omgeving. Een en ander wordt verder toegelicht in paragraaf 3.1 van deel III van dit rapport.





## 9 Nauwkeurigheid van het model

Het grondwatermodel en de bijbehorende instrumenten zijn over een periode van 2 jaar ontwikkeld ten behoeve van de ondersteuning van de besluitvorming betreffende de winning. Er is zo veel mogelijk kennis en kunde benut om het grondwatersysteem in dit deel van Zuid-Holland in het algemeen en Delfland in het bijzonder te ontwikkelen. Echter, een model is “*slechts*” een model en niet de werkelijkheid. Zowel de basisgegevens in het model als de verschillende instrumenten kennen hun eigen onzekerheden en gebruiksmogelijkheden. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de interpretatie en gebruiksmogelijkheden van de databestanden voor het grondwatermodel en de modelinstrumenten. Er wordt getracht antwoord te geven op vragen als: Hoe nauwkeurig is het grondwatermodel en wat bepaalt de nauwkeurigheid?

Het grondwatermodel bootst de werkelijkheid zo goed mogelijk na, daarvoor is maximaal gebruik gemaakt van de beschikbare data en kennis van de deelnemende en betrokken partijen. Door te kiezen voor een hoge resolutie (25 x 25 m) kunnen ook kleinschalige variaties in de grondwaterstroming in beeld worden gebracht. Er is pas sinds kort ervaring opgebouwd om op deze regionale schaal een dergelijk detailmodel op te zetten. In de regio Delfland is het nog niet eerder toegepast.

Deze versie van het grondwatermodel is het resultaat van een uitgebreid traject zowel binnen de uitvoerende projectgroep als in samenspraak met belanghebbenden. Daarmee is het het beste model van dit moment. Er zijn gebieden waar het model minder goed presteert dan in andere gebieden, veroorzaakt door verschillen in ingewikkeldheid van het systeem en kennis en data over het systeem. Het is mogelijk dat voor toekomstige studies of bij toekomstige versies deze onderdelen meer aandacht krijgen. Het grondwatermodel zal het sterkst verbeteren door het model te gebruiken in projecten en nieuwe kennis uit deze projecten te blijven toevoegen.

De verschillen tussen model en werkelijkheid kunnen voortkomen uit verschillende bronnen. In deze paragraaf wordt een aantal mogelijke onzekerheidsbronnen van het grondwatermodel beschreven.

### 9.1 Ruimtelijke onzekerheden

Het model is ontwikkeld op een 25x25 m resolutie. Echter, niet alle vlakdekkende informatie die gebruikt wordt in het model kent ook dit hoge detailniveau. Met name de ondergrondinformatie heeft dit hoge detailniveau niet. REGIS (Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem) is ontwikkeld op een resolutie van 100x100 m. Hoe dieper je komt in de ondergrond, des te lager het detailniveau van de kennis is. Het detailniveau hangt af van de hoeveelheid beschikbare boringen en het afzettingsmilieu van de sedimenten. Een uitzondering hierop is de ontwikkeling van het 3D deklaagmodel voor het interessegebied rond het DSM terrein. Daarin zijn naast boringen ook sonderingen gebruikt en is een model opgeleverd op 25 meter schaal.

Details in de ondergrondinformatie hebben niet overal evenveel effect op het uiteindelijke modelresultaat. Details in de ondiepe ondergrond ( $\pm$  de eerste 15 meter onder maaiveld) zoals de wijze van bouwrijp maken van woonwijken zijn van groot

belang voor de berekende grondwaterstanden. Algemeen kan gesteld worden dat het lastig is om in stedelijk gebied de juiste informatie in het model te krijgen.

De locatie en de ligging van buisdrainage in zowel landelijk als stedelijk gebied en de ligging van greppels zijn niet exact bekend voor iedere cel van 25x25 meter. Deze zijn daarom op basis van schattingen in het model verwerkt. Het kan dus voorkomen dat, door gebrek aan kennis, percelen te veel of te weinig afvoermogelijkheden hebben in het model.

Met betrekking tot het oppervlaktewater is voor een groot deel van alle waterlopen kennis beschikbaar gekomen via Delfland. In sommige gevallen is een schatting gedaan van bodemhoogten en bodembreedten. Voor Pijnacker-Nootdorp, Vlaardingen en Delft is extra informatie via verschillende bewerkingen toegevoegd. Dergelijke processen zijn foutgevoelig. Bij de uitvoering van berekeningen met het oppervlaktewatermodel is gebleken dat stroming vanuit de boezem richting de dieper gelegen polders een bepalende factor is bij het berekenen van de afvoer vanuit de polders. Er zijn geen eenduidige meetreeksen of experimenten bekend die uitsluitsel geven over de hoeveelheid waardoor de werkelijke infiltratieweerstand slechts geschat kan worden.

Uit analyse is gebleken dat er vooral in stedelijk gebied afwijkingen kunnen voorkomen in het vlakdekkende maaiveld. Dat maaiveld is gebruikt bij het genereren van het ondergrondmodel, het schatten van waterpeilen en het bepalen van de GHG in relatie tot al dan niet voorkomen van wateroverlast. Dat maaiveld is semi-automatisch bepaald/berekend door een filtering uit te voeren op het beschikbare AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland). De filtering is niet nieuw maar in stedelijk gebied treden eenvoudig 'complicaties' op. De indruk is dat het berekende maaiveld in stedelijk gebied gemiddeld hoger komt te liggen veroorzaakt door de relatief veel verstoringen van het AHN patroon rond wegen. Metingen van de putdekselhoogten geven nog enig houvast maar bieden geen zekerheid bij het vaststellen van het maaiveld rond bijv. woningen.

## 9.2 Temporele onzekerheden

Deze versie van het grondwatermodel is opgesteld voor de periode 1994-2004. Variaties door de tijd voor de verschillende invoergegevens zijn zo goed mogelijk verwerkt in het model. Neerslag- en verdampingscijfers zijn op dagbasis ingevoerd. Samen met CAPSIM (het model voor de onverzadigde zone) levert dit een nauwkeurige grondwateraanvulling op dagbasis op. Landgebruik is gedurende de modelperiode constant gehouden, dit zorgt voor onzekerheden in de grondwateraanvulling te meer omdat het gebied in de loop van de tijd veel stedelijke ontwikkeling heeft gekend. Onttrekkingshoeveelheden zijn zo veel mogelijk per maand verzameld en gebruikt in het model. Voor het oppervlaktewatersysteem zijn vaste zomer- en winterpeilen gebruikt voor de gehele periode. De meest recente peilinformatie is hiervoor gebruikt. Variaties van peilen in de tijd, zoals kortdurende afvoergolven of aanpassingen van het peilbesluit door de jaren heen, zijn in het model niet opgenomen. Daarbij is aangenomen dat waterlopen altijd watervoerend zijn. Van al deze temporele onzekerheden is een combinatie van grondwateraanvulling en waterpeilen de belangrijkste onzekerheidsbron.

### 9.3 Nauwkeurigheid van berekende effecten

De nauwkeurigheid waarmee effecten van mogelijke ingrepen op de actuele grondwatersituatie kunnen worden berekend is naar verwachting groter dan de nauwkeurigheid van de modeluitkomsten t.o.v. metingen. Immers, structurele afwijkingen tussen model en meting kunnen bij het berekenen van het effect tegen elkaar wegvallen, omdat zowel in de actuele situatie als in de situatie met ingreep met hetzelfde model wordt gerekend.

Echter, in tegenstelling tussen de actuele grondwatersituatie zijn van effecten van toekomstige maatregelen geen metingen beschikbaar en kunnen de effecten niet onafhankelijk getoetst worden. Het is daarom zinvol tijdens en na de uitvoering van maatregelen, de effecten te meten en te vergelijken met de gemodelleerde effecten. Vandaar het nadrukkelijke advies om het monitoringnetwerk rond het DSM terrein in te richten. Dit verhoogt de kennis omtrent de nauwkeurigheid van de gemodelleerde effecten en geeft de mogelijkheid tijdig bij te sturen als de werkelijkheid toch anders reageert dan op basis van het model te verwachten was.

### 9.4 Conclusie

Een eenduidig antwoord op wat de kwaliteit van het grondwatermodel is niet gemakkelijk te geven, omdat het gebied zowel door geohydrologische verschillen als door verschillen in informatiedichtheid (metingen etc.) zeer divers is. Echter, voorop staat dat in het ontwikkeltraject *maximaal* gebruik gemaakt is van alle vlakdekkende kennis over het grondwatersysteem. De werking van het model is geanalyseerd en geijkt op gemeten grondwaterstanden en dynamiek. Het gebruik van het model voor specifieke gebieden zal in de toekomst moeten uitwijzen waar het model en de achterliggende database nog verdere aanpassing behoeven.

## 10 Referenties

- Cultuurtechnische Vereniging (1988) Cultuurtechnisch Vademecum.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Wageningen, PUDOC. Simulation monograph.
- Harbaugh, A.W. en M.G. McDonald (1988): A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Book 6. Chapter A1. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey ([www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)).
- Massop, H.Th.L. 2002. Landelijke karakterisering buisdrainage, intern Rapport, Alterra Wageningen, data te downloaden via de website van Alterra: <http://www.alterra.wur.nl>
- Snepvangers, J.J.J.C. en W.L. Berendrecht (2007) et al.: MIPWA - Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer. TNO, Alterra, Royal Haskoning en Tauw.
- Valstar J.R. (2001): 'Inverse modeling of groundwater flow and transport', Proefschrift TU Delft.
- Veldhuizen, A.A., Poelman, A., Stuyt, L.C.P.M. 1998a. Software documentation for SIMGRO V3.0: regional water management simulator. SC Technical Document 50, 289 p.
- Wesseling, J.G. 1991. 'CAPSEV: Steady state moisture flow theory; Program description; User manual.' Report 37. Staring Centre, Wageningen, The Netherlands. 51 pp.

## Deel III – Kwaliteitsmodel Grondwater

In het kader van het DSM onderzoek is er een lokaal, gedetailleerd, stoftransport model ontwikkeld om voor verschillende onttrekkingsscenario's de (verandering in) chloride concentraties te berekenen over een periode van 50 jaar. Dit lokale model valt binnen een al bestaand regionaal stoftransportmodel, het PZH model (Minnema *et al.*, 2004). Voor de stoftransportberekeningen is de Deltares code MOCDENS3D gebruikt, zoals beschreven in Oude Essink (1998). Dit is een aangepaste variant van MOC3D, Konikow *et. al* (1996), waarbij de advectie-dispersie vergelijking opgelost wordt met een deeltjesverplaatsingstechniek (Method Of Characteristics) voor advectief transport van stoffen door het poreuze medium. Daarnaast wordt dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming expliciet meegenomen. De chloride concentraties die berekend worden voor het lokale model dienen samen met de berekende chloride concentraties voor het buitengebied met het PZH model als invoer voor het SOBEK oppervlaktewater kwaliteitsmodel.

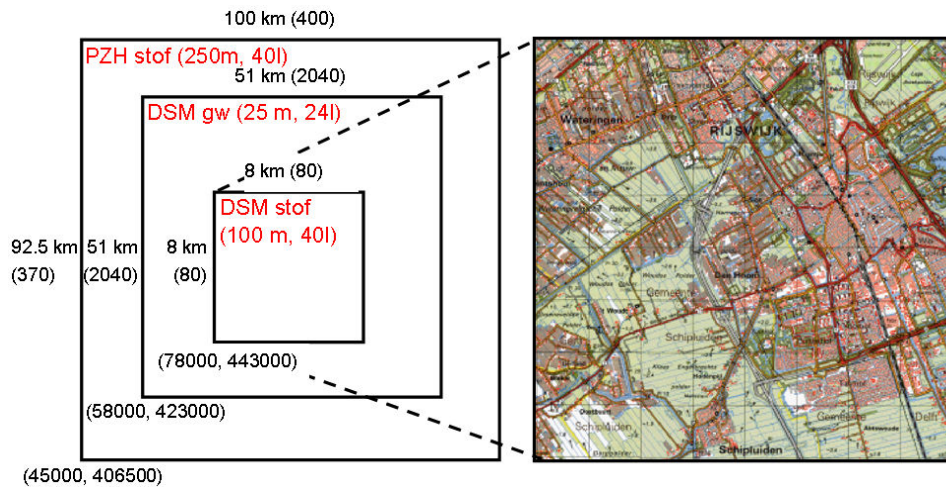
In dit deel wordt de gevolgde werkwijze besproken die de modelbouw beschrijft en de daarbij gemaakte keuzes. Vervolgens worden resultaten gegeven voor de onttrekkingsscenario's van de winning en wordt beschreven hoe deze data als invoer dienen voor het SOBEK oppervlaktewater model. Daarmee is vervolgens berekend in hoeverre doorspoeling van het oppervlaktewatersysteem nodig is om verzilting te voorkomen.



# 1 Ontwikkeling Stoftransportmodel

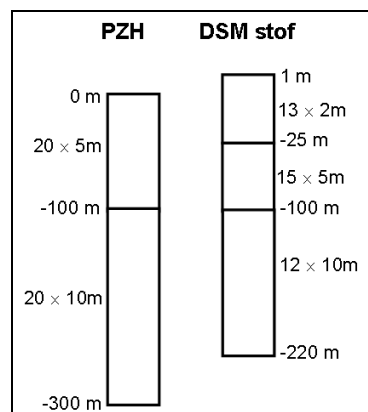
## 1.1 Horizontale en verticale resolutie en interessegebied

In Figuur 1.1 staan de rekengebieden weergegeven van het regionale PZH stoftransportmodel, het grondwatermodel en het (lokale) stoftransportmodel. Er is een interessegebied van 8 km bij 8 km gekozen rondom Delft gekozen, waarbij het rekengebied deels verschoven is naar het Zuiden en Oosten ten opzichte van de winning op het DSM terrein. De getallen in de figuur geven de dimensies aan zoals het aantal modelcellen, de grootte van de modelcel [m] en het aantal modellagen [l].



Figuur 1.1: Rekengebieden van het PZH model, DSM grondwatermodel en DSM stoftransportmodel.

In de afweging van rekentijd versus nauwkeurigheid is er gekozen voor een horizontale resolutie van 100m en een verticale verfijning van 24 lagen naar 40 lagen, zie Figuur 1.2. De onderverdeling in de verticaal van fijn (2m dik) naar grof (10m dik) is gemaakt op basis van de dikte van de aanwezige deklaag.



Figuur 1.2: Horizontale modellagen van het PZH en DSM stoftransportmodel.

## 1.2 Opbouw basismodel

Om tot een basis stoftransportmodel voor het interessegebied te komen dat geschikt is om met MOCDENS3D te rekenen zijn een aantal stappen doorlopen. Deze stappen zullen hier kort besproken worden.

### Stap 1: conversie iMOD model

Uitgangspunt is een geijkt 25m stationair grondwatermodel (intern runnummer 25\_t059). Vervolgens is dit model in 100m resolutie geëxporteerd door iMOD naar een MODFLOW-88 model. Reden is dat het programma MODTMR, waarmee de verticale verfijning wordt aangebracht, dit vereist. Met het programma im2mf96 (zie ook Tabel 5.1 in de referentielijst van hoofdstuk 5) is het geëxporteerde model geconverteerd naar MODFLOW-96 invoer. Met dit model is MODFLOW-96 gedraaid met als doel startstijghoogten in binair format te genereren die het programma MODTMR als (dummy) invoer vereist.

### Stap 2: Verticale verfijning met MODTMR

Het programma MODTMR, zie Leak & Claar (1998) is toegepast om de verticale verfijning aan te brengen, als aangegeven in Figuur 1.2. Hiertoe is echter een intern aangepaste versie van MODTMR gebruikt en verder aangepast. De optie CUTTYPE\_3 is uitgebreid en de code is geschikt gemaakt om rechtstreeks rasters in te lezen en om te verfijnen naar volledig horizontale lagen. De reden dat we net als het PZH model horizontale modellagen willen is enerzijds om zo goed mogelijk aan te sluiten op de zijrand, en anderzijds omdat de geïmplementeerde stijghoogtecorrectie in MOCDENS3D door dichtheidsverschillen conceptueel gezien alleen juist is voor volledig horizontale modellagen. Verder is ervoor gekozen om de parameterisatie van de verfijnde lagen te doen aan de hand van de stationair geijkte doorlaatvermogens en weerstanden van de lagen. De invoer bestaat uit:

- Het MODFLOW-96 model (run t\_059);
- $k_h$ ,  $k_v$  rasters: afgeleid met een AML (arcinfo programmeertaal) uit de geijkte  $kD$  en  $c$ -waarde rasters;
- Boven- en onderkanten van de lagen (m NAP);
- Bovenkant (m NAP) van de nieuwe eerste horizontale laag en de diktes (m) van de nieuwe horizontale lagen.

### Stap 3: Instationaire zijrandvoorwaarden aanmaken voor GHB package

Het rekegebied van het stoftransport model is voorzien van instationaire stijghoogte/concentratie zijrandvoorwaarden (Oost, West, Noord, Zuid; verticaal in de diepte) verkregen met het PZH model. Hiertoe is gekozen om de uitstraling van fouten, geïntroduceerd op de zijranden, zo klein mogelijk te houden. De volgende procedure is gehanteerd:

1. De PZH randcellen waarbij het celmidden het dichtst bij het celmidden van de DSM randcel ligt zijn bepaald en de coördinaten zijn naar een .obs invoer file weggeschreven, waar de zgn. observatiepunten in staan, zie Appendix A Konikow *et.al.*, 1996. Dit is gedaan met het programma mkobs;
2. Het PZH model is voor een periode van 200 jaar doorgerekend voor een onttrekkingsscenario, en dit levert een .oba output file op, met stijghoogten/concentratie in de PZH randcellen op jaarbasis;
3. De .oba output file is uitgelezen en weggeschreven naar rasters (Oost, West, Noord, Zuid rasters). Deze hebben een afmeting van 33 x 40 (Noord, Zuid) en 31 x 40 (Oost, West), aangezien de hoekpunten in de Noord/Zuid rasters zitten;



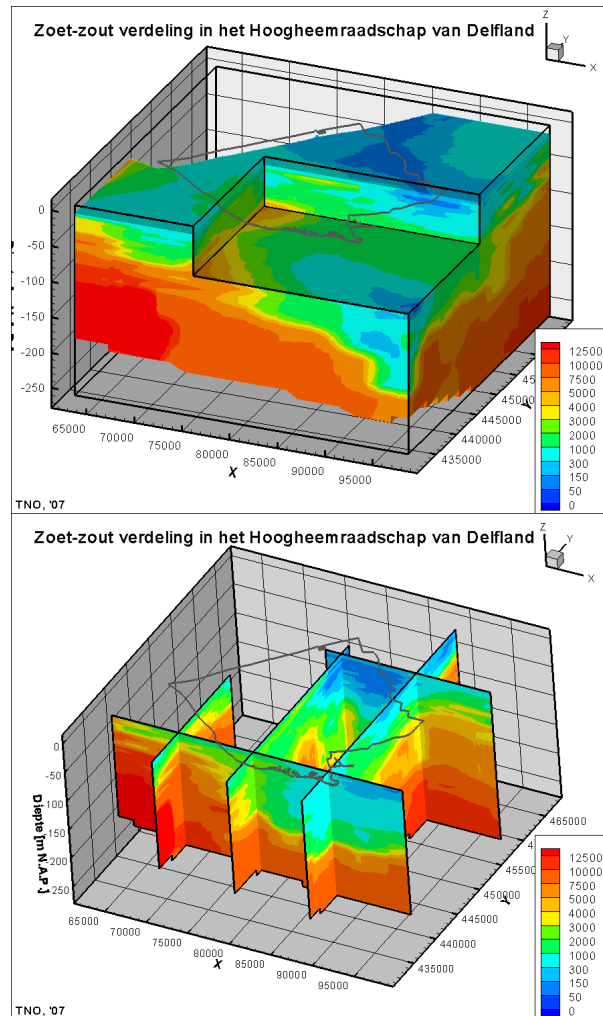
4. Deze rasters zijn lineair geïnterpoleerd naar de zijranden van het DSM stoftransport model, middels het MATLAB programma interpvert;
5. Tenslotte is de General Head Boundary (GHB) package aangemaakt om de stijghoogte/concentratie randvoorwaarde op te leggen middels een hoge conductance (100.000 m<sup>2</sup>/dag). Dit is gedaan voor een periode van 100 jaar, waarbij er om de 2 jaar nieuwe data wordt opgegeven om geheugen ruimte te besparen. Met het MATLAB programma mkgghb is de GHB package aangemaakt.

Als bovenrandvoorwaarde is de stationaire grondwateraanvulling overgenomen uit het grondwatermodel. Omdat de zijrandvoorwaarde echter niet stationair van aard is, is er ook sprake van een niet stationair stromingsveld.

#### **Stap 4: MOCDENS3D packages aanmaken**

Voor MOCDENS3D zijn de volgende invoer files / packages vereist, zie Appendix A van de documentatie voor MOC3D, Konikow et.al (1996):

- Mocmain.dat: hoofd invoer bestand voor het MOC3D gedeelte met o.a. solver parameters. Hierin staat per laag de initiële concentraties en diktes. De concentraties zijn bepaald uit de meest recente initiële concentratie rasters van het PZH model en geïnterpoleerd (middels dichtbijzijnde buur) naar de stoftransport modellen (Figuur 1.3). Dit is gedaan met het MATLAB programma interphoriz. Verder zijn de solver settings van het PZH model zoveel mogelijk overgenomen, met uitzondering van de dispersie coëfficiënten waarvoor de waarde 0,5 m. gekozen is voor longitudinale dispersie en 0,2 m. voor zowel horizontale/verticale transversale dispersie. Met het MATLAB programma mkmocmain is de mocmain.dat aangemaakt;
- Chloride concentratie van de grondwateraanvulling is verondersteld op 35 mg Cl/l, aannemende dat geïnfiltreerd regenwater in aanraking met de (onverzadigde) bodem een ietwat hogere chloride concentratie krijgt;
- Voor de waterlopen is een chloride concentratie van 125 mg Cl/l aangenomen indien deze infiltreren.



Figuur 1.3: Initiële 3D chloride concentratie in het studiegebied.

### 1.3 Stabiliteit en simulatieperiode

Een belangrijk aspect in stoftransport modellering is stabiliteit van de rekenmethode wat inherent is aan de gebruikte expliciete rekenmethodes. Instabiliteiten hangen bijvoorbeeld sterk samen met het initiële chloride veld en lokale pieken in grondwater fluxen in het model. Er zijn een aantal testruns gedaan met het stoftransportmodel, waarbij de numerieke tijdstap, gelieerd aan advectie, dispersie en injectie, zijn weggeschreven als rasters en is gekeken in welke modelcel deze het kleinst zijn. Deze analyse heeft de volgende aanpassingen van het model opgeleverd:

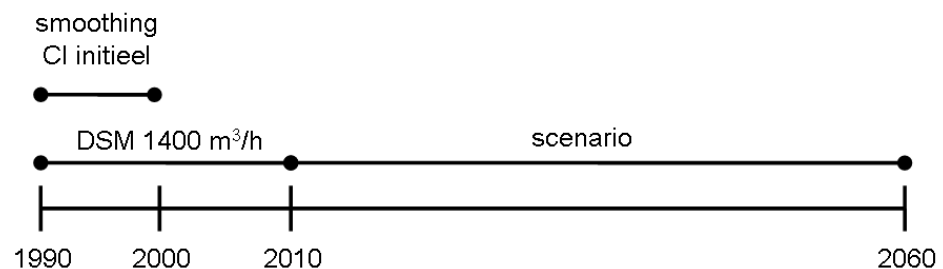
- Het puttenveld op het DSM terrein zorgt voor lokaal grote fluxen die beperkend zijn voor het zogenaamde injectie stabiliteitscriterium (Konikow *et al.*, 1996). Er is gekozen om de onttrekkingsdebieten te verdelen over een aantal modelcellen, via een polygoon, zoals aangegeven in Figuur 1.4, zwarte zone. Dit is gedaan met het programma smoothwell. De grondwateronttrekkingen bevinden zich in de modellagen 14 t/m 17;
- De zijrandvoorwaarden zorgen lokaal voor kleine tijdstappen om aan het injectie en advectie criterium te kunnen voldoen. Dit treedt voornamelijk op aan de Oost rand van het model waar de modellagen niet goed aansluiten met de PZH lagen. De

volgende regel is gehanteerd: voor elke randcel waarbij de tijdstap kleiner is dan 30 dagen wordt de conductance flink verkleind om de redelijke tijdstappen te verkrijgen.



Figuur 1.4: Winning DSM terrein verdeeld over een polygon.

Het gevolgde simulatie proces is weergegeven in Figuur 1.5. De aangegeven jaartallen dienen niet als strikt absolute waarden te worden geïnterpreteerd. De reden hiervoor is dat de initiële chloride verdeling zowel nieuwe als oude metingen bevat en er hierdoor aan deze dataset niet een absoluut jaartal te hangen valt. Om deze reden beperken we ons slechts tot relatieve verschillen tussen de scenario's. Verder is een smoothing van de initiële concentratie verdeling noodzakelijk om tot een stabiele oplossing te komen. Hiertoe is de moleculaire diffusiecoëfficiënt, die standaard  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s genomen is gedurende de eerste 10 jaar van de simulatie significant verhoogd. De basis van het stoftransportmodel is het stationaire grondwatermodel. Dat betekent dat tijdens de simulatieperiode gerekend wordt met constante waarden voor grondwateraanvulling, onttrekkingen en waterpeilen.



Figuur 1.5: Simulatieperiode voor scenario berekeningen.

In detail bestaat een scenario simulatie uit de volgende stappen:

- 1990-2000:
  - Nul-run waarbij de stabiliteitstijdstappen (advectie/dispersie/injectie) worden weggeschreven.
  - De GHB package aanpassen op basis van deze tijdstappen (adjstress).

- Draaien van het stoftransportmodel met een hoge moleculaire diffusie (om de zoet-zout verdeling te 'smoothen') en de berekende concentratie rasters wegschrijven.
- 2000-2010:
  - GHB splitsen waarbij de eerste 10 jaar wordt overgeslagen (splitghb).
  - Mocmain.dat aanmaken met concentratie berekend voor 1990-2000 (mkmocmain).
  - Draaien van het stoftransportmodel met een (fysisch realistische) moleculaire diffusie en de berekende concentratie rasters wegschrijven.
- 2010-2060:
  - Mocmain.dat aanmaken met concentratie berekend voor 2000-2010 (mkmocmain).
  - Oorspronkelijke GHB splitsen waarbij de eerste 20 jaar wordt overgeslagen.
  - Scenario: Kopiëren van de correcte onttrekkingen (WEL-package).
  - Nulrun waarbij de stabiliteitstijdstappen (advectie/dispersie/injectie) worden weggeschreven.
  - De GHB package aanpassen op basis van deze tijdstappen.
  - Draaien van het stoftransportmodel met een (fysisch realistische) moleculaire diffusie en de resultaat concentratie rasters wegschrijven.

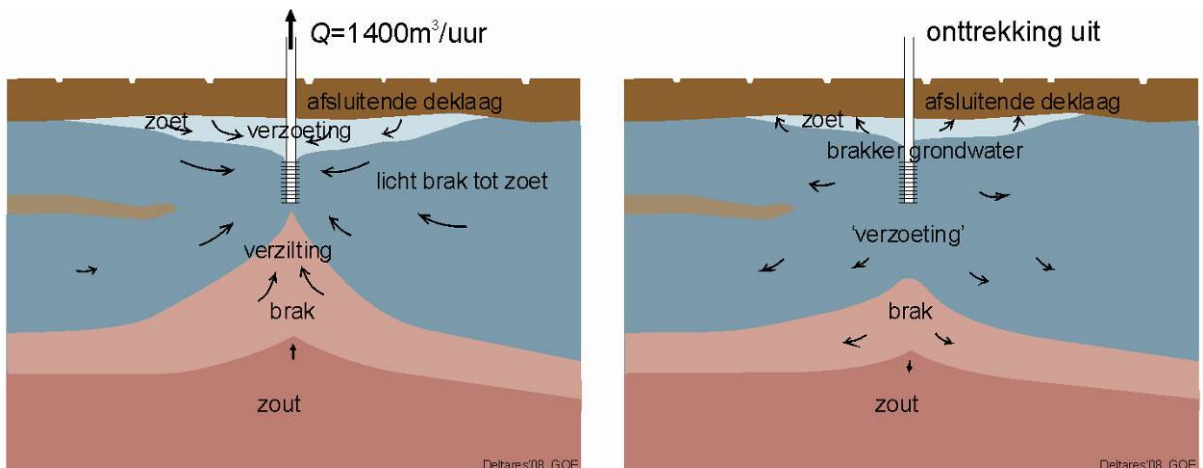
## 2 Resultaten interessegebied voor winning scenario's

Bij de beschrijving van de resultaten bereken ons tot de volgende twee scenario's:

1. winning aan, met een debiet van  $1400 \text{ m}^3/\text{uur}$ ;
2. winning gesloten ( $0 \text{ m}^3/\text{uur}$ ).

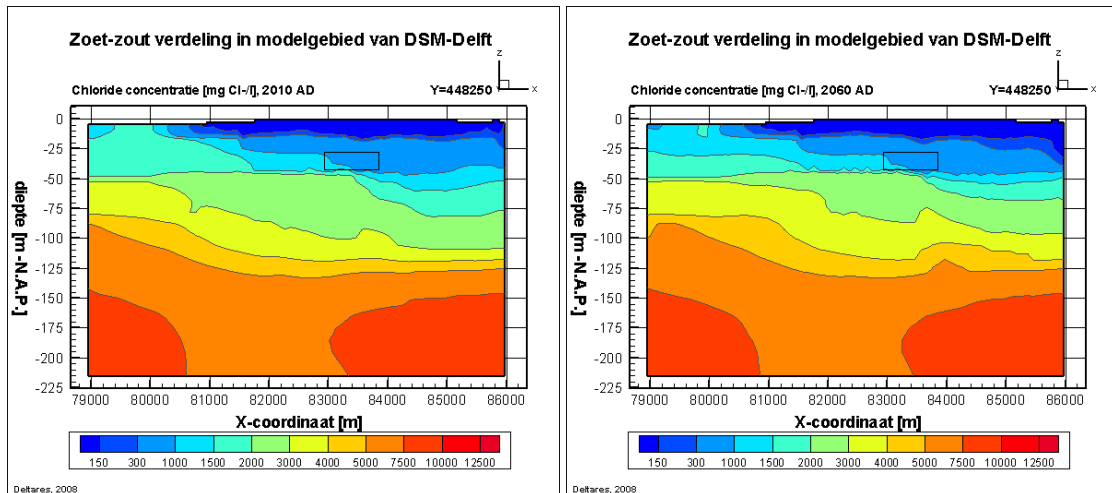
Het tussenscenario van  $800 \text{ m}^3/\text{uur}$  is achterwege gelaten. Uit de resultaten van het worst case scenario waarbij de winning wordt gesloten bleek namelijk dat het effect op de oppervlaktewaterkwaliteit gering is.

Zolang de winning in stand blijft vindt het volgende proces plaats (zie Figuur 2.1). Zoet tot licht brak water komt vanuit het oppervlaktewatersysteem het grondwatersysteem binnen. Dit geïnfiltreerde water heeft over het algemeen een lagere concentratie dan het aanwezige grondwater, zodat er ter plaatse verzoeting optreedt. Tegelijkertijd vindt opkegeling van brak tot licht zout grondwater plaats vanuit het diepe grondwatersysteem.

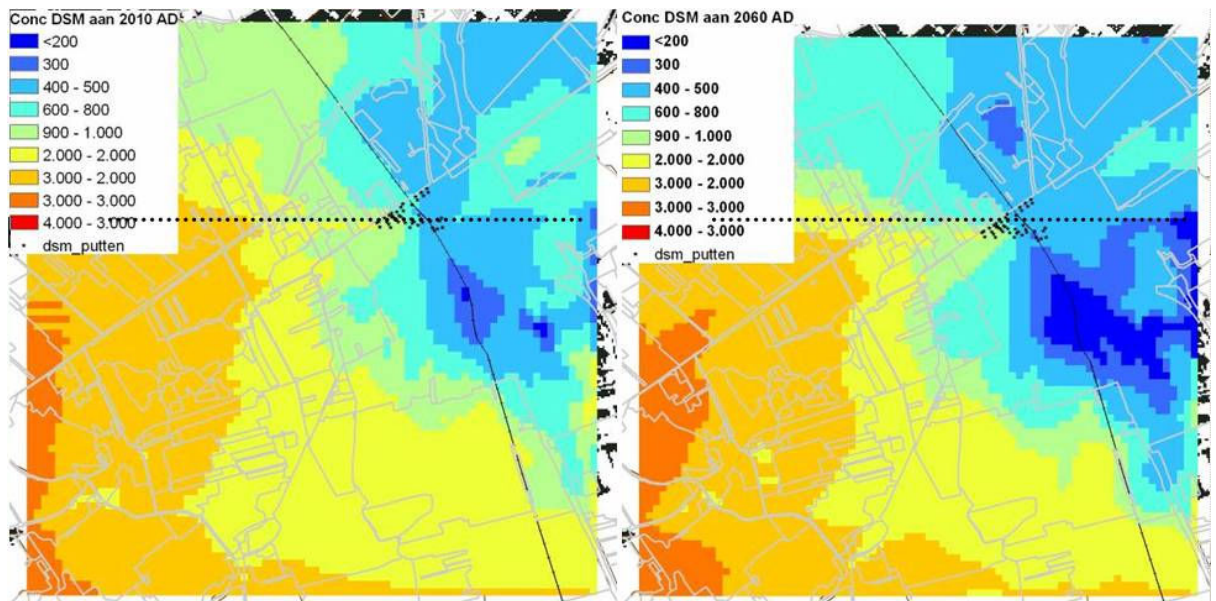


Figuur 2.1: Grondwaterstroming en transport van zoet, brak en zout grondwater in twee verschillende situaties: a. Winning aan: verzoeting vanuit het oppervlaktewatersysteem en opkegeling vanuit de ondergrond, en b. Winning uit: voorheen geïnfiltreerd 'zoet' oppervlaktewater stroomt opwaarts af en brak grondwater onder de onttrekking zakt langzaam weg

In Figuur 2.2 en Figuur 2.3 is het resultaat te zien van de numerieke modellering van zoet, brak, en zout grondwater op twee momenten in de tijd: de chloride concentratie in een 2D profiel over de onttrekking op 2010AD en op 2060AD. De winning blijft aan staan in deze simulatie. Er vindt verzoeting plaats boven en verzilting onder de onttrekking.



Figuur 2.2: Chloride concentratie in een 2D profiel over de winnig (Y=448250m): huidige situatie (2010 AD) en over 50 jaar (2060 AD). De onttrekking staat nog steeds aan en is gepositioneerd in de zwarte box.

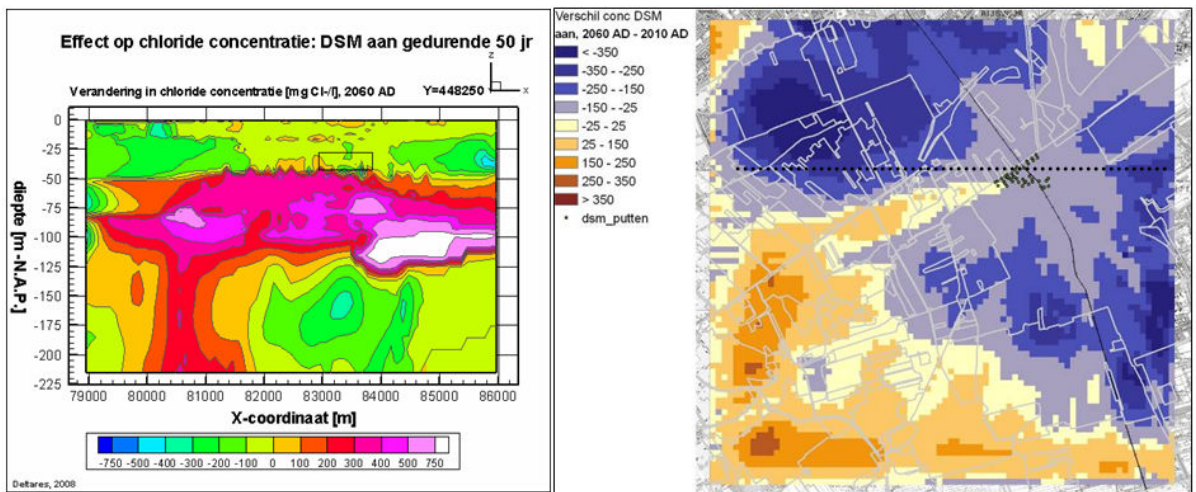


Figuur 2.3: Chloride concentratie in het horizontale vlak (modellaag 13: -24m N.A.P., net boven de onttrekking): huidige situatie (2010 AD) en over 50 jaar (2060 AD).

Figuur 2.4 laat deze twee processen nog iets duidelijker zien. Figuur 2.4a toont de verzoeting én de verzilting in het verticale vlak, en Figuur 2.4b laat de verzoeting zien in het horizontale vlak, bóven de onttrekking op -24 m. N.A.P. Daarnaast lijkt er een laterale grondwaterstroming op te treden richting de onttrekking. Figuur 2.4b, die is afgeleid uit Figuur 2.1a en Figuur 2.1b, laat zien dat er in een periode van 50 jaar brak tot licht zout grondwater vanuit het zuidwesten in de richting van de winnig op het DSM terrein stroomt.

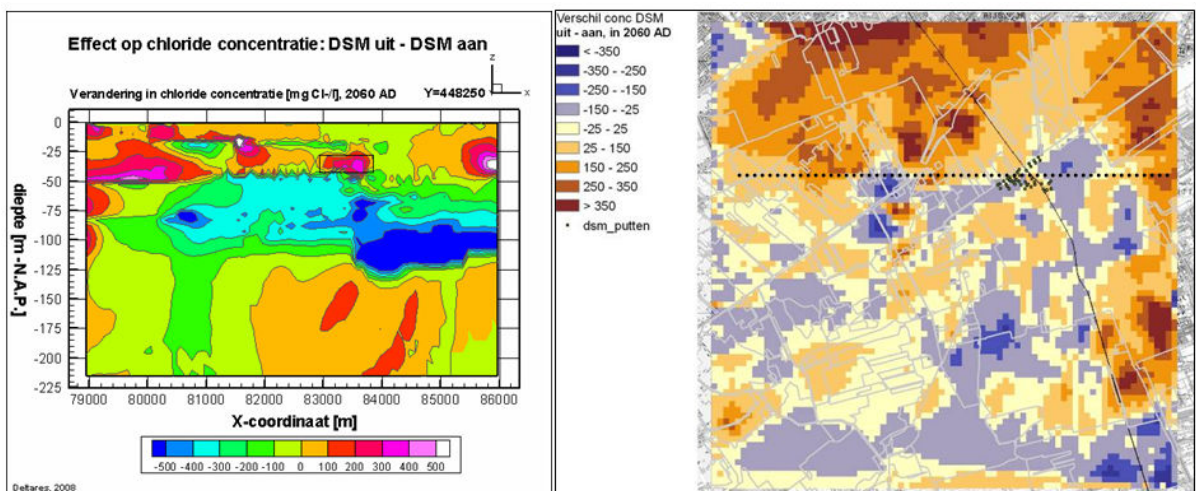
Over het algemeen duurt het lang voordat er veranderingen in chloride concentraties optreden. Daarnaast zijn deze veranderingen niet groot omdat de initiële chloride concentratie verdeling slechts (licht) brak is. Pas op grote diepte neemt de concentratie

toe, maar dit grondwater bereikt niet het oppervlaktewater binnen de termijn waarnaar wordt gekeken.



Figuur 2.4: Verschil in chloride concentratie (situatie 2060 AD minus 2010 AD) in geval de winning aan blijft gedurende de komende 50 jaar: a. in een 2D profiel (Y=448250m; onttrekking is gepositioneerd in de zwarte box): rode-paarse gebieden betekent verzilting en b. in het horizontale vlak (modellaag 13: -24m N.A.P.): blauwe gebieden betekent verzoeting.

Vanaf het moment dat de grondwaterwinning wordt uitgezet verandert het stromingspatroon. Er zal meer opwaartse stroming van brak grondwater (kwel) richting het maaiveld optreden, zodat het grondwatersysteem boven de onttrekking licht zal verzilten, t.o.v. de situatie dat de grondwaterwinning aan staat. Bovenstaande processen zijn te extraheren uit Figuur 2.1b en Figuur 2.5.



Figuur 2.5: Verschil in chloride concentratie over 50 jaar (2060 AD): winning uit minus winning aan. a. in een 2D profiel (Y=448250m; onttrekking is gepositioneerd in de zwarte box) : (licht-)blauwe gebieden betekent verzoeting en b. in het horizontale vlak (modellaag 13: -24m N.A.P.): bruine-oranje gebieden betekent verzilting.

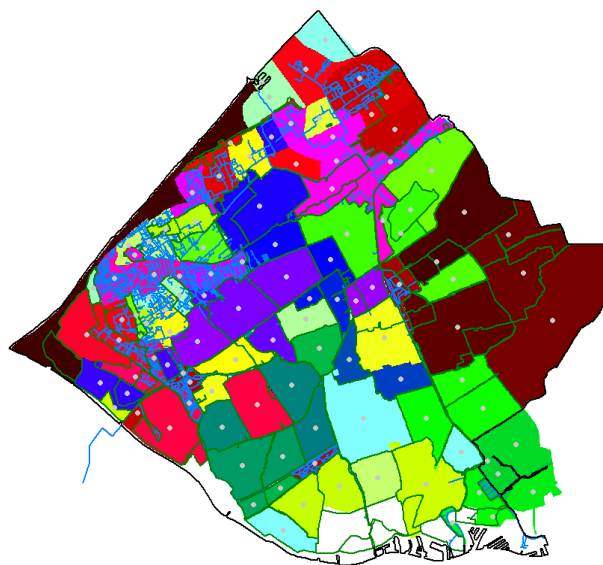




### 3 Invoer voor het SOBEK oppervlaktewater model

De berekende chloride concentraties voor de verschillende onttrekkingsscenario's dienen weer als invoer voor het SOBEK waterkwaliteitmodel dat gedurende een korte periode van één tot enkele jaren het effect op de concentratie van het mengwater berekent.

De uitwisseling van waterfluxen en concentraties richting Sobek vindt plaats op een aantal vast punten in het oppervlaktewaterstelsel, meestal een gemaal of een ander kunstwerk. Achter deze punten ligt een zogenaamd Sobek segment, een gebied waarvan de totale afvoer dan wel aanvoer op een vast punt aan het Sobek model gekoppeld is (zie Figuur 3.1).



Figuur 3.1: Sobek segmenten waarvoor concentratie en waterflux wordt bepaald

Het stoftransportmodel berekent echter de grondwatersituatie stationair en op jaarbasis en mist daardoor de in SOBEK gebruikte dynamiek van rekenen op uurbasis waarbij rekening wordt gehouden met de dynamiek van de neerslag. Door het verschil in tijdschalen kan het stoftransport model dus niet de dynamische gedrag van het grondwater en de chlorideconcentratie beschrijven. Daarom is er voor een pragmatische oplossing gekozen. Uitgangspunt is dat water dat door het topsysteem wordt afgevoerd voor een deel uit zoet water (grondwateraanvulling) en voor een deel uit brak/zout water (kwel) bestaat. Die verhouding wordt bepaald door de verhouding tussen de kwelflux richting de waterloop en de totale afgevoerde hoeveelheid water. Deze fluxen zijn berekend met het niet stationaire 25m grondwatermodel (1400 m<sup>3</sup>/uur: run 25\_t2036; 0 m<sup>3</sup>/uur: 25\_t2040) en leveren uitkomsten voor elke 14<sup>e</sup> en 28<sup>e</sup> van een maand. Op basis van deze river-, drain- en kwelfluxen berekent het programma *conc* gemiddelde Cl-concentratie én afvoerflux voor ieder SOBEK segment.

1. Bepaal voor elke cel de kwelflux factor  $\alpha_s$  :

$$\alpha_s = \min\left(\frac{q_{kwel}}{q_{tot}}, 1\right), \quad q_{tot} = q_{riv} + q_{drm}$$

waarbij  $q_{riv}$  en  $q_{drm}$  de *drainerende* fluxen [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] naar resp. de waterlopen en buisdrainage voorstellen,  $q_{drm}$  de totale drainage flux [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] is, en  $q_{kwel}$  de kwelflux [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] is van modellaag 2 naar modellaag 1.

2. De gemiddelde concentratie  $c$  en gemiddelde drainage flux (exclusief boezem)  $q$  in een SOBEEK segment, bestaande uit  $i = 1, \dots, N$  cellen, wordt gegeven door

$$c = \frac{\sum_i (c_{kwel} q_{tot} \alpha_s + c_{rch} q_{tot} (1 - \alpha_s))}{q}, \quad q = \sum_i q_{tot}$$

waarbij  $c_{kwel}$  [ $\text{mg/l}$ ] de berekende concentratie in cel onder de waterloop is,  $c_{rch} = 35$  [ $\text{mg/l}$ ] de concentratie van de grondwateraanvulling, en  $q_{tot}$  de totale drainage flux [ $\text{m}^3/\text{d}$ ] in de cel  $i$  is.

3. De gemiddelde flux per SOBEEK segment is berekend middels:

$$q = \sum_i q_{tot}, \quad q_{tot} = q_{riv} + q_{drm}$$

waarbij  $q_{drm}$  de buisdrainage flux is en  $q_{riv}$  zowel kan draineren als infiltreren.

Deze berekeningen zijn gedaan voor concentraties berekend met zowel het DSM stoftransportmodel (interessegebied) als het PZH model (buitengebied) waardoor voor het gehele gebied van Delfland resultaten beschikbaar komen. In deze berekeningen is alleen de aan- en/of afvoer door polderwaterlopen, greppels en drains meegenomen. De boezemwaterlopen zijn onderdeel van het Sobek model en zijn daarom niet meegenomen.

### 3.1 Modelaanpassing waterlopen en infiltratieweerstand

In bovenstaande paragraaf is beschreven hoe de flux richting het oppervlaktewater is vastgesteld. Daarbij is de flux vanuit de polderwaterlopen, greppels en drains gescheiden van de flux vanuit de boezem.

Bij eerste analyse van de fluxen bleek echter dat de totale hoeveelheid flux die via de polderwaterlopen het model verlaat (tot afstroming komt in het oppervlaktewater) veel hoger was dan verwacht mag worden. Dat is aanleiding geweest om het gekalibreerde model op dit punt nader te bekijken.

Het volgende bleek het geval te zijn. Op veel plekken liggen polderwaterlopen én boezemwaterlopen in een en dezelfde modelcel. Omdat de waterpeilen van beide waterlopen verschillen (polderpeil is lager) treedt er op die plaatsen ten onrechte een zogenaamde kortsluitstroming op; water infiltreert vanuit de hoger gelegen boezem en wordt gedraineerd door de lager gelegen polderwatersloot. In werkelijkheid zit er weerstand tussen beide waterlopen (enkele meters bodemmateriaal). In het grondwatermodel grijpen beide elementen echter in het celmidden aan en is de enige

weerstand tussen beide de drainageweerstand van de bodem. Omdat die laag is stroomt water eenvoudig vanuit de boezem in de polderwaterloop.

Om dit probleem van kortsluitstroming op te lossen is besloten dat in die modelcellen waar een boezemwaterloop ligt géén polderwaterloop of drainage aanwezig mag zijn. Van die elementen wordt de weerstand oneindig hoog gezet (of conductance = 0). Deze aanpassing heeft slecht effect op de freatische grondwaterstand in de directe omgeving van de boezem. Wordt de waterbalans opnieuw bekeken dan blijkt dat zowel de flux vanuit de boezem als de flux naar de polderwaterlopen minder zijn geworden maar dat de som van beide fluxen gelijk is gebleven.

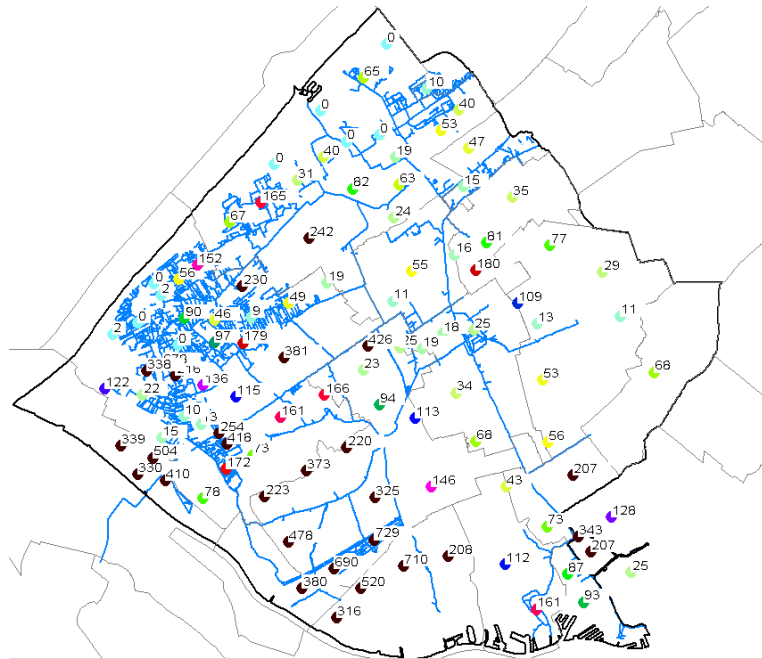
Bovenstaande analyse richtte de aandacht ook op de infiltratieweerstand van de boezemwaterlopen in het model. Dat de infiltratieweerstand hoger is dan de drainageweerstand wordt algemeen aangenomen maar naar de werkelijke hoogte van de infiltratieweerstand is weinig tot geen onderzoek gedaan. Voor ijking is uitgegaan van een drainageweerstand van 1 dag en een infiltratieweerstand die altijd het dubbele is, in dit geval dus 2 dagen. Er zijn eventueel hogere infiltratieweerstanden mogelijk, wellicht tot 20 of lokaal 50 dagen. Wat de waarde is moet nader (veld)onderzoek uitwijzen. Mondelinge informatie van de gemeente Delft geeft wel aan dat wanneer er een ontgraving is in de buurt van de boezem, het waterpeil vrij snel gelijk is met het peil in de boezem. Dat wijst op een goed (hydrologisch) contact met de boezem. Ook het uitbaggeren van de grachten kan leiden tot een lage infiltratieweerstand. Op basis van bovenstaande is alleen de infiltratieweerstand van de boezem in het landelijke gebied verhoogd. In plaats van de originele infiltratiefactor van 2 (infiltratieweerstand is 2x drainageweerstand) wordt nu als infiltratiefactor 20 aangehouden, ofwel 'conductance' maal factor 1/20.

### 3.2 Resultaten Delfland

Aan de hand van enkele figuren geeft deze paragraaf inzicht in de effecten van de winning op de oppervlaktewaterkwaliteit. De concentratie dan wel de concentratieontwikkeling van het oppervlaktewater wordt bekeken per Sobek knooppunt.

Figuur 3.2 geeft allereerst de gemiddelde concentraties voor de SOBEEK segmenten na 50 jaar voor het scenario dat de winning sluit. Deze situatie is vergeleken met de situatie waarin de winning aan blijft. Figuur 3.3 laat het verschil tussen beide situatie zien. Daarbij gaat het om het gemiddelde verschil in concentratie over het jaar 2003. Daarvoor zijn de verschillen op de 14<sup>e</sup> en 28<sup>e</sup> van elke maand in 2003 gemiddeld.

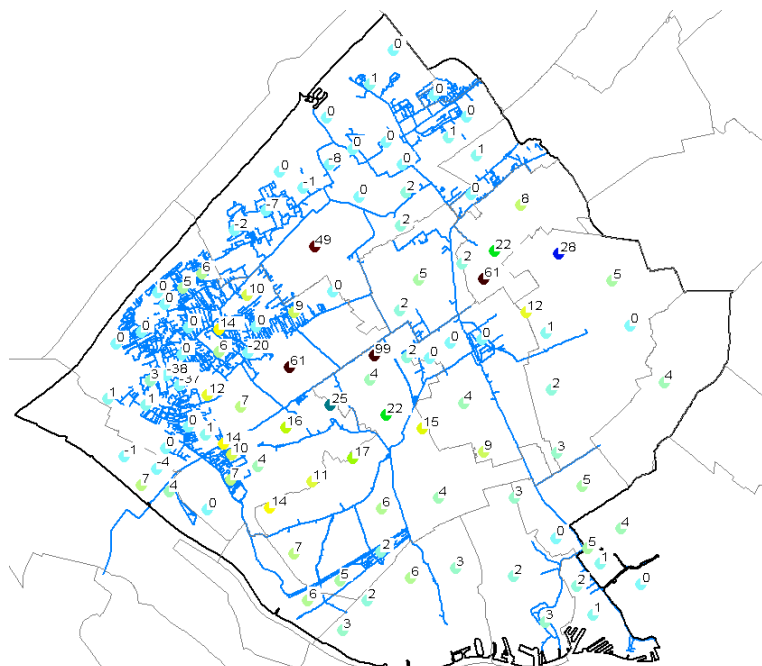
Zoals verwacht zullen de verschillen over het jaar 2003 niet overal even groot zijn. Om zicht te krijgen op mogelijke uitschieters laat Figuur 3.4 de maximale concentratietoename zien. Als achtergrond van de figuur zijn de gebieden gekleurd die na sluiten van de winning kwel- dan wel infiltratiegebied blijven en gebieden waar een omslag van infiltratie naar kwel wordt verwacht.



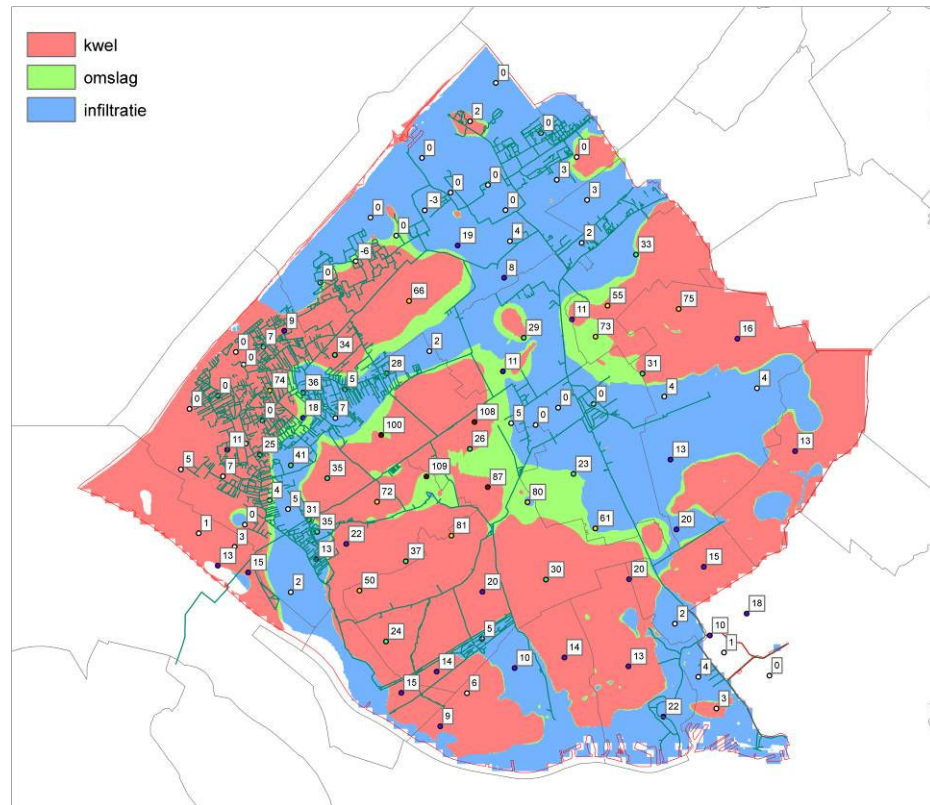
Figuur 3.2: Gemiddelde chloride concentraties voor de winning uit over 50 jaar met fluxen uit 2003

De verwachting is dat in die gebieden waar een infiltratiesituatie blijft bestaan (en dus geen toename van brakke/zoute kwel) er geen toename van de chlorideconcentratie in het oppervlaktewater verwacht wordt. Figuur 3.4 laat in die gebieden waarden 0 zien. De grootste effecten treden op in die gebieden waar brakke/zoute kwel gaat toenemen of waar infiltratie omslaat in kwel.

Uit Figuur 3.3 en Figuur 3.4 valt op te maken dat de toename van de chlorideconcentratie veroorzaakt door het sluiten van de winning marginaal is.



Figuur 3.3: Gemiddelde toename chloride concentratie over 50 jaar bij sluiting winning met fluxen uit 2003

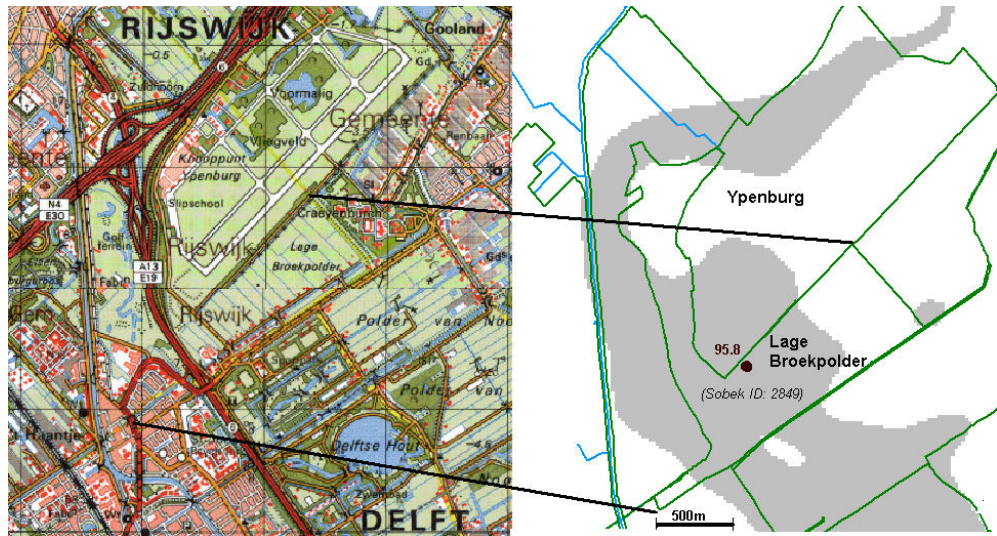


Figuur 3.4: Maximale toename chloride concentraties over 50 jaar bij sluiting winning, inclusief kwel-infiltratiegebieden, met fluxen uit 2003.

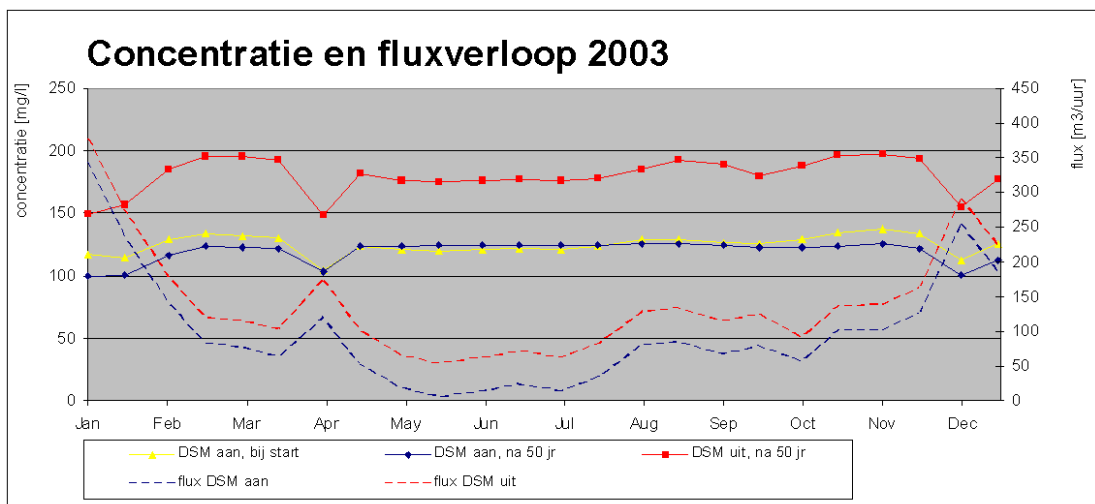
### 3.3 Resultaat Lage Broekpolder

Deze paragraaf neemt een Sobek segment nader in beschouwing. Figuur 3.5 laat de Lage Broekpolder nabij Ypenburg zien inclusief het gebied waar infiltratie om zal slaan naar kwel. In dit peilgebied wordt dus een relatief hoge concentratietoename verwacht indien de winning wordt gesloten. Als er wordt uitgegaan van de fluxen van het jaar 2003 dan blijkt de gemiddelde concentratie voor dit gebied gemiddeld 60 [mg/l] en maximaal 70 [mg/l] toe te nemen.

De Lage Broekpolder wordt in het SOBEK model gerepresenteerd door SOBEK segment nummer 2849. Voor dit segment zijn de gemiddelde concentratie en flux berekend middels resp. methode 2. en 3. voor het jaar 2003. Figuur 3.6 laat de bijbehorende chloride- en flux tijdreeksen zien. Duidelijk is een uniforme concentratieverhoging van circa 60 [mg/l] waar te nemen. Het concentratieverschil t.g.v. de verplaatsing van het zoutveld over 50 jaar voor scenario 'winning aan' lijkt minimaal te zijn. Verder neemt de afvoerflux via de waterlopen toe door het uitzetten van de winning. Duidelijk te zien is dat het zomerpeil een kleinere afvoerflux genereert met een minimaal effect op de chloride concentraties.



Figuur 3.5: Omslaggebied infiltratie naar kwel (grijs) in de omgeving van de Lage Broekpolder. Voor het SOBEK segment 2849 bedraagt de maximale concentratie toename 73 [mg/l] in een situatie als 2003.



Figuur 3.6: Concentratie- en fluxverloop voor het SOBEK segment nabij de Lage Broekpolder (ID 2849).

## 4 Referenties

- Grondwater in Zuid-Holland', NITG 04-189-B, 86 p., Utrecht, TNO Bouw en Ondergrond.
- Kipp, K.L., Konikow, L.F., Hornberger, G.Z. (1998). 'An Implicit Dispersive Transport Algorithm for the
- Konikow, L.F., D.J. Goode & G.Z. Hornberger (1996), A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D); U.S.G.S. Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 p.
- Leake, S.A. and Claar, D.V. (1999). 'Procedures and Computer Programs for Telescopic Mesh Refinement
- Minnema, B., Kuijper, B., & Oude Essink, G.H.P. (2004). 'Bepaling van de toekomstige verzilting van het grondwater in Zuid-Holland, TNO-NITG 04-189-B, 89p.
- Oude Essink, G.H.P. (1998). 'Simuleren van 3D dichtheidsafhankelijke grondwaterstroming: MOCDENS3D'. Stromingen, Nummer 1, p. 5-23.
- U.S. Geological Survey MOC3D Solute-Transport Model', USGS, Report 98-4234.
- Using MODFLOW'. Open-File Report 99-238, USGS, Tucson, Arizona.





## 5 Referentielijst gebruikte programma's

Tabel 5.1: Gebruikte FORTRAN programma's.

Programma	Beschrijving
adjstress	Verhoogt DRN/GHB/RIV conductances op basis van advectie/dispersie/injectie stabiliteitstijdstappen
conc	Berekent de instationaire, gemiddelde concentraties en drainagefluxen voor SOBEK polygonen, gebruik makend van de river/drain/kwel fluxen berekend met het DSM grondwatermodel.
im2mf96	Converteert de van iMOD naar MODFLOW-88 geëxporteerde packages naar MODFLOW-96 format
mk_mocmain	Leest concentratie .ASC rasters in en genereert de .mocmain package invoer file voor de code MOCDENS3D
mkobs	Maakt de observatiefile (.oba) met coördinaten van de randcellen op de zijranden van het interesse gebied, waarvoor het PZH stijghoogte/concentratie output moet genereren.
MOCDENS3D	USGS code, aangepast door Deltares om de advectie-dispersie vergelijking op te lossen voor zouttransport middels deeltjes verplaatsing (Method Of Characteristics) en een feitelijke koppeling tussen stijghoogte en dichtheid (annex concentratie).
MODTMR	USGS programma om een MODFLOW-96 model met een fijnere verticale resolutie te discretiseren/knippen.
oba2grid	Converteert de .oba outputfile van het PZH model, met hierin de berekende stijghoogten/concentraties op de zijranden van het interessegebied, naar 250m .ASC rasters.
smoothwell	Leest een pointer grid in en verdeelt de onttrekkingsdebiëten van de winning evenredig naar het aantal pointers over de grondwatermodellagen (10, 12 en 14) waar de onttrekkingen zich bevinden.
splitghb	Splitst de GHB package voor een opgegeven aantal stress perioden.

Tabel 5.2: Gebruikte MATLAB programma's.

Programma	Beschrijving
interphoriz	Interpoleert (dichtstbijzijnde buur) de initiële concentratie 100m grids naar de 250m grids voor het DSM stoftransport model.
interpvert	Interpoleert (lineair) de stijghoogte/concentratie grids van de PZH zijranden naar de stijghoogte/concentratie grids voor de zijranden van het DSM stoftransport model.
mkgbh	Maakt de GHB-package aan met de stijghoogte/concentratie grids gegenereerd met het programma interpvert.
mkmocmain	Maak de .mocmain invoer file aan voor MOCDENS3D met de concentratie grids gemaakt met het programma interphoriz.



# Deel IV – Kwaliteitsmodel Oppervlaktewater



# 1 Inleiding

Met SOBEK worden oppervlaktewater berekeningen uitgevoerd die beleidsbeslissingen ondersteunen. Het software pakket omvat verschillende modules waarmee onder andere neerslag-afvoer processen (Rainfall Runoff), 1D stroming in watergangen (Channel Flow) en waterkwaliteit gemodelleerd kan worden. Binnen de software omgeving kan op eenvoudige wijze een watersysteem model worden opgezet. Waarbij de gebruiker, afhankelijk van de beschikbaar data en het doel van de studie, zelf kan bepalen tot in welk detail het model opgezet wordt.

Hoogheemraadschap Delfland beschikte aan het begin van deze studie al over een SOBEK model voor haar beheersgebied. Het bestaande SOBEK model is aangepast en geschikt gemaakt voor interactie met MODFLOW (rekencode voor grondwaterstanden), zodat de stroming tussen oppervlakte en grondwater gemodelleerd kan worden. In deze studie is gebruik gemaakt van een off-line koppeling. Dat betekent dat de modellen in serie draaien. Eerst worden de modelberekeningen in MODFLOW uitgevoerd, de berekende fluxen van het grondwater naar het oppervlaktewater dienen als randvoorwaarden voor het SOBEK model. Er is aangenomen dat een online koppeling overbodig is, omdat het oppervlaktewaterpeil in Delfland constant kan worden verondersteld (afgezien van zomer en winterpeilen). Een dynamische beïnvloeding tussen grond- en oppervlaktewaterstand wordt daarom verwaarloosbaar klein verondersteld.

Met het aangepaste modelinstrumentarium wordt ook voor chloridefluxen de toestroom van grondwater naar oppervlaktewater gemodelleerd. Hiermee kan de mogelijke verzouting van het oppervlaktewater in de poldergebieden worden bepaald.

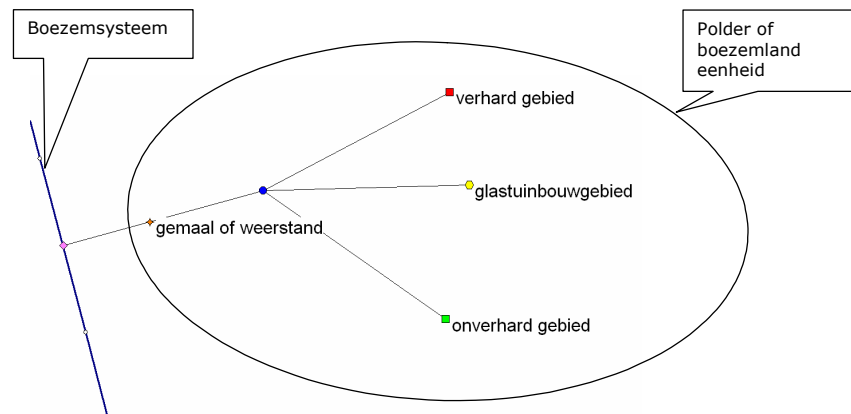


Figuur 1.1: Beheersgebied Hoogheemraadschap van Delfland (bron: website Delfland)

De gebruikte rekentijdstep van het oppervlaktewater kwantiteitmodel bedraagt 5 minuten, het oppervlaktewater kwaliteitmodel rekt met een tijdstap van 10 minuten. De rekentijdstep van het grondwatermodel bedraagt een dag maar de dataoverdracht naar het oppervlaktewatermodel gebeurt in stappen een halve maand.

## 2 Aanpassingen waterkwantiteit schematisatie

Het boezemmodel van Delfland, waarvan is uitgegaan, is gemaakt met SOBEK. Het is opgebouwd uit Chanel Flow (CF) en Rainfall Runoff (RR) elementen. De boezemwatergangen zijn opgenomen in het CF-netwerk. De polders, de poldergemalen en de “tussenboezem”-watergangen zijn opgenomen in het RR-netwerk dat afwatert op het CF-netwerk. Inlaten zijn niet in het model opgenomen. Onderstaand schema geeft het principe hiervan weer.

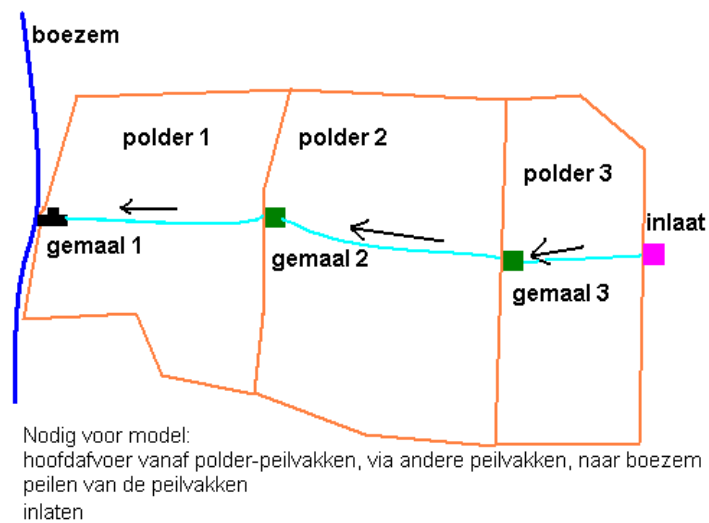


Figuur 2.1: RR-schematisatie polder

Det boezemmodel is gemaakt voor situaties met veel neerslag. Het is niet toegesneden op droge situaties. Mede door het ontbreken van inlaten is de waterbalans in het CF-gedeelte niet sluitend.

Voor het DSM-onderzoek zijn we de volgende wijzigingen doorgevoerd:

- RR-knopen die de het boezem-achterland (de polders, e.d.) beschrijven, zijn vervangen door MODFLOW-CAPSIM elementen (grondwatermodel).
- Het CF-model is uitgebreid met watergangen tot in de polders (zie onderstaande schets).
- De poldergemalen zijn in het CF-model opgenomen (zie onderstaande schets).
- De MODFLOW-CAPSIM grondwater-elementen wateren af op de nieuwe CF-polderwatergangen.
- Er zijn enkele polderinlaten toegevoegd in het model.

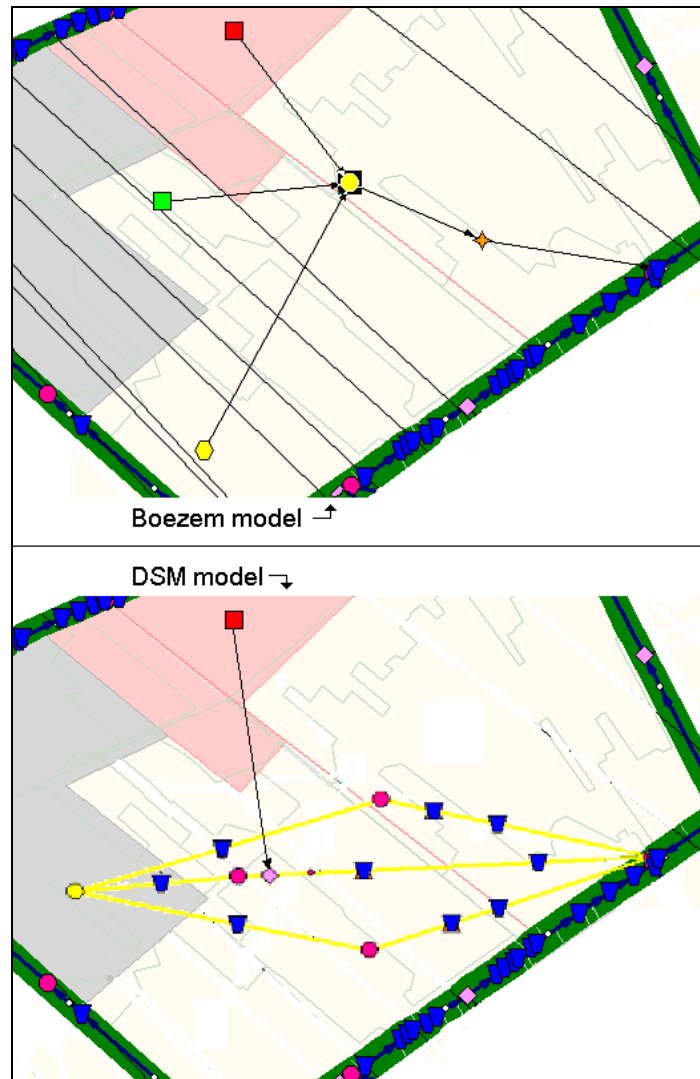


Figuur 2.2: Weergave watersysteem poldergebied.

Feitelijk is het RR-deel van het boezem model vervangen door een CF-deel dat gekoppeld is aan de boezem, en een grondwaterdeel (MODFLOW-CAPSIM) dat de uitwisseling van grondwater met de polderwatergangen regelt. Alleen de RR-knopen die in het boezemmodel het verharde gebied beschrijven, zijn in het model gebleven.

De volgende figuur geeft de originele en gewijzigde situatie weer, de RR elementen zijn grotendeels vervangen door CF elementen. De gele watertak is het nieuwe channel flow element dat gebruikt wordt voor de koppeling met MODFLOW. Dit zijn SOBEK watergangen waarnaar laterale toe- en afstroming mogelijk is.





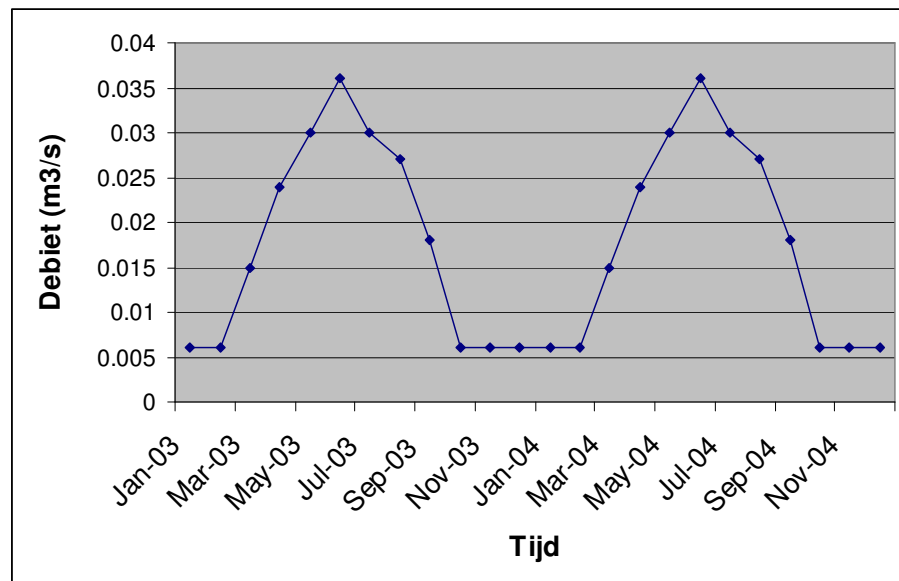
Figuur 2.3: Boven: originele SOBEK schematisatie polders, gebruikmakend van RR knopen (verhard en onverhard oppervlak en glastuinbouw). Onder: Aangepaste SOBEK schematisatie. Polders, geschematiseerd gebruikmakend van CF elementen.

## 2.1 Neerslag modellering

In de oorspronkelijk ongekoppelde schematisatie werd neerslag in SOBEK meegenomen voor open water, kassengebied, onverhard en verhard gebied. Voor de gekoppelde versie wordt alleen de neerslag op openwater en op verhard gebied meegenomen. De overige neerslag gaat rechtstreeks naar MODFLOW en kan in natte periodes eventueel via de laterale debieten van grondwater naar oppervlaktewater in het SOBEK model terecht komen. In de aangepaste SOBEK schematisatie worden alleen nog RR knopen gebruikt voor het verhard gebied, zie bovenstaande figuur. De neerslag data is afkomstig van 8 verschillende stations in en om het beheersgebied en is door het Hoogheemraadschap aangeleverd in het bestand DLF0006.BUI.

## 2.2 Peilregulatie, uit- en inlaten

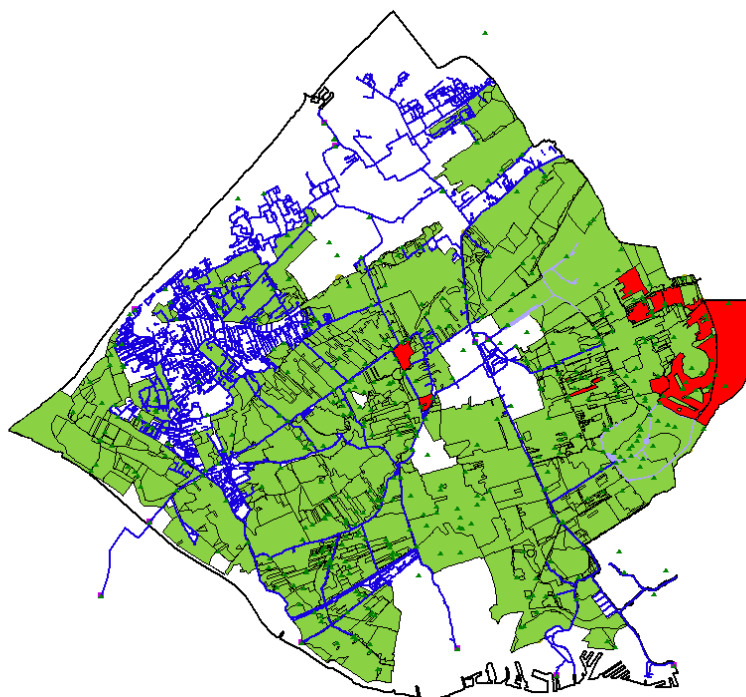
In de model schematisatie zijn per polder twee pompen opgenomen om de polderpeilen te reguleren, de polder in- en uitlaat. Dit is vergelijkbaar met de originele schematisatie. Daarnaast is een derde pomp opgenomen (zie Figuur 2.3) die de continue doorspoeling van de polder simuleert. De tijdreeksen van debieten voor deze laatste pompen zijn afkomstig uit de modellering van het Hoogheemraadschap. Het betreft tijdreeksen van debieten die variëren tussen de 0,005 en 0,05 m<sup>3</sup>/sec. Deze debieten representeren de doorspoel die in de werkelijkheid plaats heeft naast de in- en uitlaat ten behoeve van peilhandhaving.



Figuur 2.4: Voorbeeld van doorspoeldebiet voor polder ten noordoosten van Delft.

## 2.3 Extra polders

Het bestaande SOBEK model is uitgebreid met 7 extra “open water”-knopen voor de polders. Deze knopen representeren polders die eerder deel uitmaakten van grotere / aangrenzende polders, maar volgens GIS gegevens een lager peil hebben dan deze aangrenzende polders (50 centimeter tot 2 meter). Daarom zijn ze nu als kleinere polder met een eigen peil in SOBEK gemodelleerd. In onderstaande kaart zijn in rood de nieuwe polders aangegeven.



Figuur 2.5: Polders Delfland, rood weergegeven de aan het SOBEK model toegevoegde polders

In de volgende tabel staan de gegevens van de toegevoegde openwater knopen en de bijbehorende gemalen. Gegevens zijn in principe afgeleid uit de GIS-kaarten en het door Delfland aangeleverde Excel bestand 'algemene gegevens poldergemalen'. Waar oppervlaktes ontbraken, of een onderdeel waren van bestaande gebieden, zijn de oppervlaktes naar verhouding verdeeld.

Tabel 2.1: Nieuwe toegevoegde polders

Polder	kwkident	Locatie	Capaciteit (m <sup>3</sup> /s)	Oppervlak (ha)	Zomer peil (mNAP)	Winter peil (mNAP)
POL109II	109101	Woudselaan 15	29	208	-2,85	-2,95
POL109XI	109103	Kikkerkade	2,5	24	-1,9	-1,9
		pomp 1 en 2	2,5	24	-1,9	-1,9
Pol213XD	213131	Molenlaan 10	35	291	-5,25	-5,4
POL202	202131	Noordpldr, Munnikenweg	11,6	140	-6,3	-6,3
POL202	202138	Meerweg	0,6	12	-5,45	-5,55
POL221IT	221134	Zuideindseweg	1,5	1,26	-3,65	-3,65
POL221IR	221131	Overgauwseweg	0,6	1,26	-3,55	-3,6

## 2.4 Laterale debieten

De met MODFLOW berekende drainage- en kwelfluxen stromen SOBEEK in via laterale debieten op de watergangen. De tijdsafhankelijke polderfluxen worden door MODFLOW berekend in  $\text{m}^3$  per seconde per polder. Per halve maand worden waarden aangeleverd en vervolgens omgerekend naar flux in vierkante meter per meter watergang. Voor elke polder is aangegeven op welke SOBEEK watergangen in de desbetreffende polder de MODFLOW flux afwatert dan wel infiltreert.

De netto infiltratie fluxen vanuit de boezem naar het grondwater zijn gedurende het jaar constant, maar vertonen ruimtelijke variatie. Alhoewel voor de polderwatergangen gewerkt is met een in tijd variërende flux van MODFLOW naar SOBEEK, is voor de boezemwatergangen de vereenvoudiging gemaakt dat deze flux constant is.

Aangenomen kan worden dat de infiltratie vanuit de boezemwatergangen vrij constant is, omdat peilfluctuaties hier minimaal zijn. De laterale fluxen zijn opgenomen in het SOBEEK schematisatie bestand "lateral.dat".

## 2.5 Randvoorwaarden

Het hoogheemraadschap heeft voor alle boezemgemalen voor de periode 2002 tot 2006 in- en of uitlaat gekwantificeerd (Presentatie-calibratie-Qgemalen1.xls). In 2003 werd volgens deze gegevens alleen bij de gemalen Den Dolk en Winsemius water ingelaten (zie Figuur 1.1).

Deze inlaatdebieten zijn als randvoorwaarde opgelegd. Voor de overige gemalen zijn de gegevens uit de oorspronkelijke schematisatie gebruikt. Water wordt hier uitgelaten zodra de waterstand boven de -0,4 m. t.o.v. NAP stijgt. Elke pomp is in het model opgenomen met zijn werkelijke capaciteit.

Ook voor de modelgrens in het westen wordt een constante waterstand randvoorwaarde van -0,4 m. t.o.v. NAP gehandhaafd met behulp van een gemaal waarvan de capaciteit, of wel doorstroom, gelijk is aan de capaciteit gebruikt in het oorspronkelijke model, 67,5 m/s.

Bij de eerste waterkwaliteits simulaties bleek de chloride piek nabij Parksluizen zwaar onderschat te worden door het model. Ook bleek de waterbalans niet overeen te komen met de uit de praktijk afgeleide waterbalans van 2003 (Bakkum, 2008). Een van de oorzaken bleek te zijn dat de schut en lekverliezen niet waren opgenomen in het model. Deze treden met name nabij Parksluizen op en bedragen in netto 16,7 miljoen  $\text{m}^3$  per jaar het waterschapsgebied in. De lekfluxen bij Parksluizen zijn nu opgenomen in het model, de totale flux voor 2003 is hier 12 miljoen  $\text{m}^3$ . Aangezien geen gegevens beschikbaar waren van lekverliezen als functie van tijd is de totale flux over het jaar verdeeld als een constante flux van 0,38  $\text{m}^3$  per seconde.

### 3 Aanpassingen waterkwaliteit schematisatie

Voor de modellering van de chlorideconcentraties is het SOBEK model uitgebreid met de waterkwaliteit module.

#### 3.1 Randvoorwaarden

De volgende initiële condities en randvoorwaarden zijn voor chloride gebruikt.

<i>Initiële conditie:</i>	Voor het gehele watersystemen is een initiële concentratie van 140 mg/l opgegeven.
<i>Neerslag:</i>	Voor de neerslag is een chloride concentratie van 35 mg/l gebruikt.
<i>Gemalen:</i>	<p>Alleen bij gemaal Winsemius werd in 2003 water het gebied in gemalen, verder traden bij gemaal Parksluizen significante schut- en lekverliezen op. Voor deze locaties zijn daarom de chloride randvoorwaarden met zorg bij elkaar gezocht.</p> <p>Het hoogheemraadschap heeft een bestand met chloride meetgegevens voor het Brielse Meer aangeleverd, deze gegevens zijn afkomstig van waterschap Hollandse Delta en het betreft een tijdreeks met een tijdstap van een week. De nabij gemaal Winsemius gemeten chloride concentraties zijn opgenomen voor de modelrand bij dit gemaal.</p> <p>De chloride gegevens voor de modelrand nabij gemaal Parksluizen zijn verkregen via de Waterdienst (Helpdesk Water, 2008). Dit betreft een tijdreeks van chloride concentraties gemeten in de Nieuwe Waterweg voor 2003 met een tijdstap van een uur.</p> <p>Voor de overige gemalen zijn, indien beschikbaar, de chloride concentraties gebruikt uit het bestand "Chloridemetingen.xls", aangeleverd door Hoogheemraadschap Delfland. Voor de overige modelranden zijn constante concentraties van 140 mg/l gebruikt.</p>
<i>Grondwater:</i>	Met het stofstromenmodel voor de bodem zijn concentraties berekend van de fluxen van MODLFOW naar SOBEK. Deze concentraties verschillen per polder en worden als tijdreeks per polder ingevoerd. De tijdstap is een halve maand. De concentraties worden ingevoerd bij de watergangsegmenten waar de grondwaterfluxen het oppervlaktewater model binnenstromen. Dit gebeurt in het bestand "boundwq.dat".



## 4 Modelresultaten

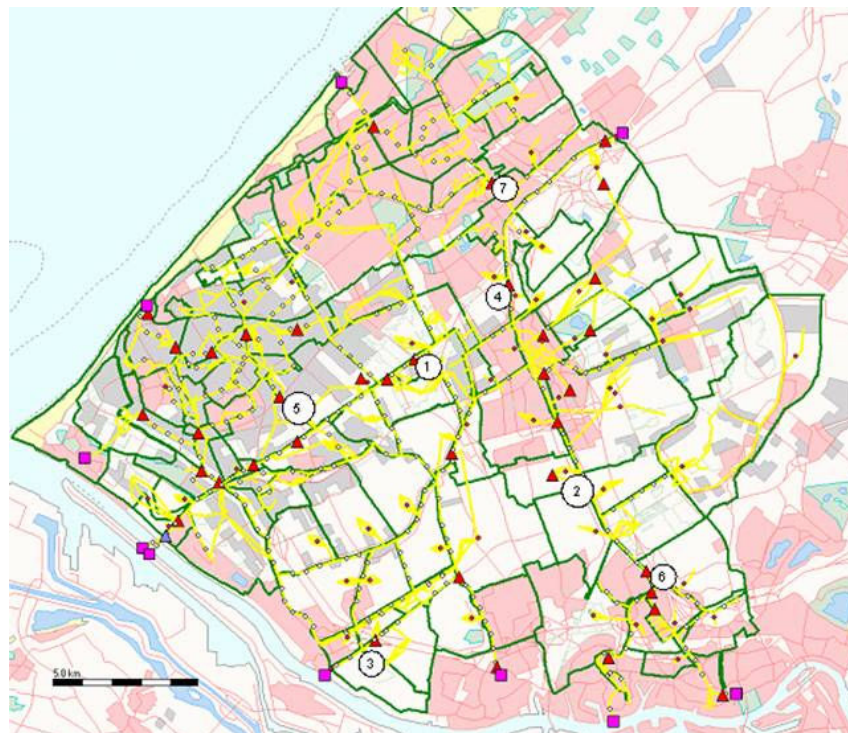
Zoals eerder vermeld zijn de volgende scenario's met het modelinstrumentarium doorgerekend:

- Winning uit na 1 jaar;
- Winning aan na 1 jaar ~ referentie situatie;
- Winning uit na 50 jaar;
- Winning aan na 50 jaar.

De fluxen voor de berekening na 1 jaar en na 50 jaar zijn steeds dezelfde. De fluxen verschillen alleen tussen de situatie met de winning aan en uit. Op basis van deze fluxen is met het grondwaterkwaliteitsmodel de chloride concentratie in de fluxen naar het oppervlaktewater bepaald na 1 en na 50 jaar.

### 4.1 Analyse punt locaties

De kaart in Figuur 4.1 geeft een overzicht van de locaties waarvoor de chloride concentraties tussen de verschillende scenario's vergeleken zullen worden.

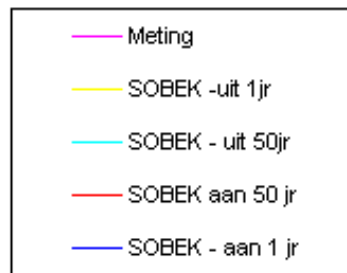


Figuur 4.1: Monitoringslocaties chloride gebruikt voor analyse resultaten modelstudie

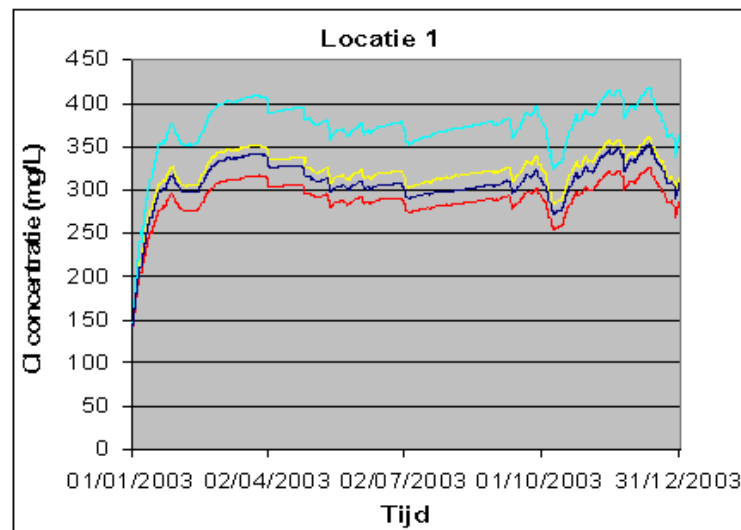
Locatie 1, 2, en 4 zijn gekozen omdat ze nabij de pomplocatie liggen. Locatie 6 is geselecteerd omdat in dit gebied de hoogste chloride worden waargenomen. De locaties 5 en 7 zijn toegevoegd om ook een indruk te krijgen van een groter gebied rondom de pompen. Bij locatie 3 is de toename van de chlorideconcentratie in de grondwaterflux het grootst en hier kan daarom het grootste effect op de chloride in het oppervlaktewater worden verwacht.

De fluxen voor de twee scenario's waarbij de winning is gesloten zijn even groot. Voor het gehele gebied zijn de fluxen van het grondwater naar de polderwatergangen over het jaar gemiddeld groter voor de scenario's waarbij de winning uit is. Slechts voor twee polders wordt er voor een periode van een maand een grotere flux waargenomen bij de scenario's waar de pompen in werking zijn. Dit betreft twee polders in het zuidwesten van het gebied, grenzend aan de nieuwe waterweg. Deze fluxen zijn afkomstig uit het MODFLOW model.

Hieronder worden de resultaten van de verschillende scenario's voor de hierboven aangegeven locaties weergegeven. Voor de locaties 3, 4, 5 en 6 zijn meetdata beschikbaar en die zijn opgenomen in de grafieken.

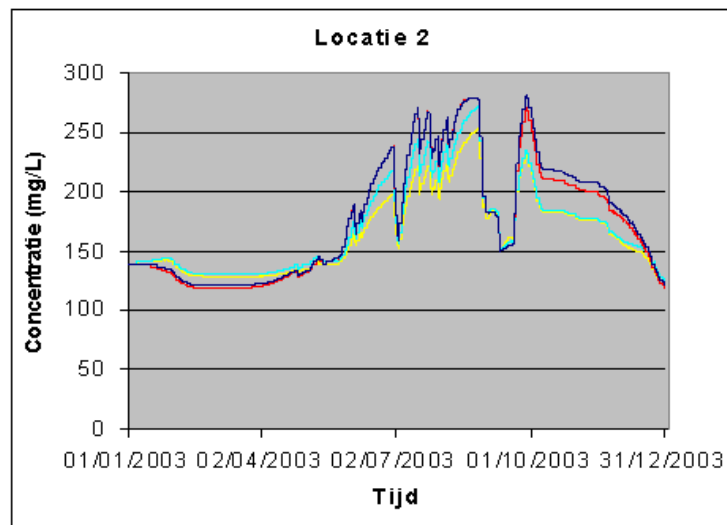


Figuur 4.2: Legenda grafieken SOBEK waterkwaliteit resultaten

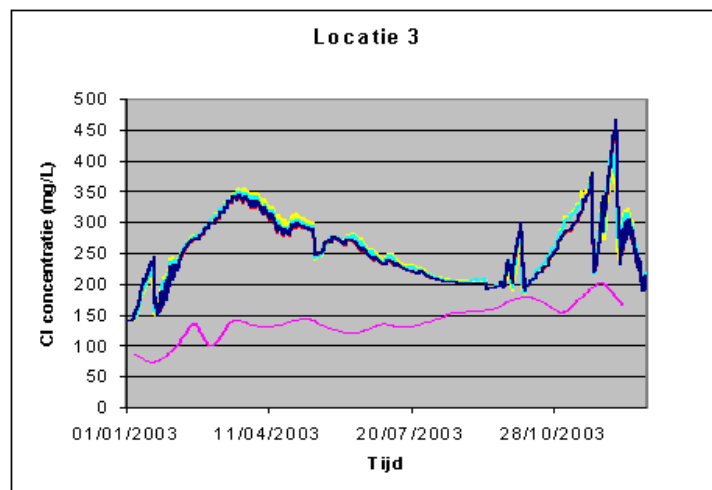


Figuur 4.3: Berekende chloride concentraties voor locatie 1 nabij DSM terrein

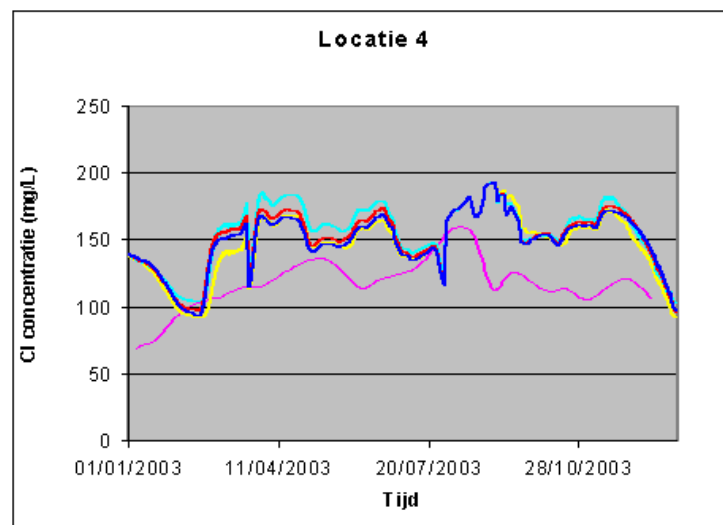




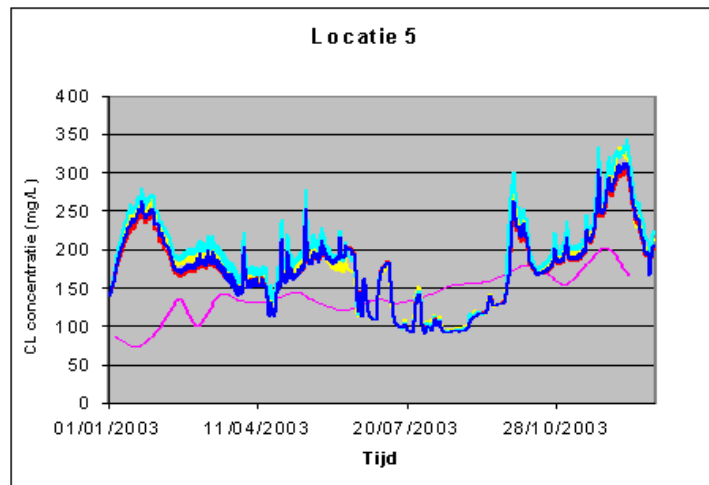
Figuur 4.4: Berekende chloride concentraties voor locatie 2 nabij DSM terrein



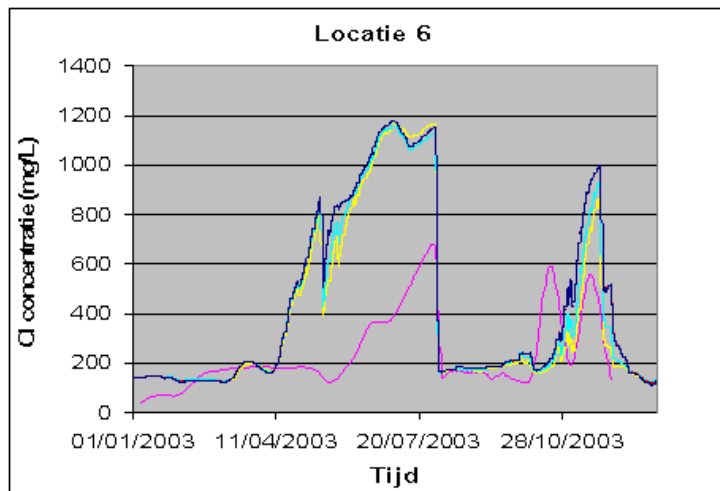
Figuur 4.5: Berekende chloride concentraties voor locatie 3, hoogste chloride concentratie in grondwater flux



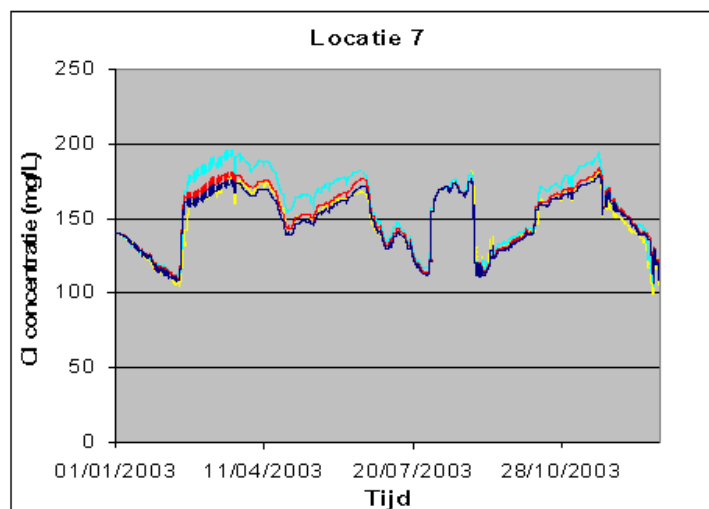
Figuur 4.6: Berekende chloride concentraties voor locatie 4 nabij DSM terrein



Figuur 4.7: Berekende chloride concentraties voor locatie 5 op relatief grote afstand van DSM terrein



Figuur 4.8: Berekende chloride concentraties voor locatie 6, hoogste chloride concentraties



Figuur 4.9: Berekende chloride concentraties voor locatie 7 op relatief grote afstand van DSM terrein

Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat de chloride concentratie geringe verschillen vertonen tussen de verschillende scenario's. Alleen op locatie 1, gelegen nabij het DSM terrein zijn de verschillen groot, deze lopen op tot ongeveer 100 milligram per liter op een maximale concentratie van 420 milligram per liter.

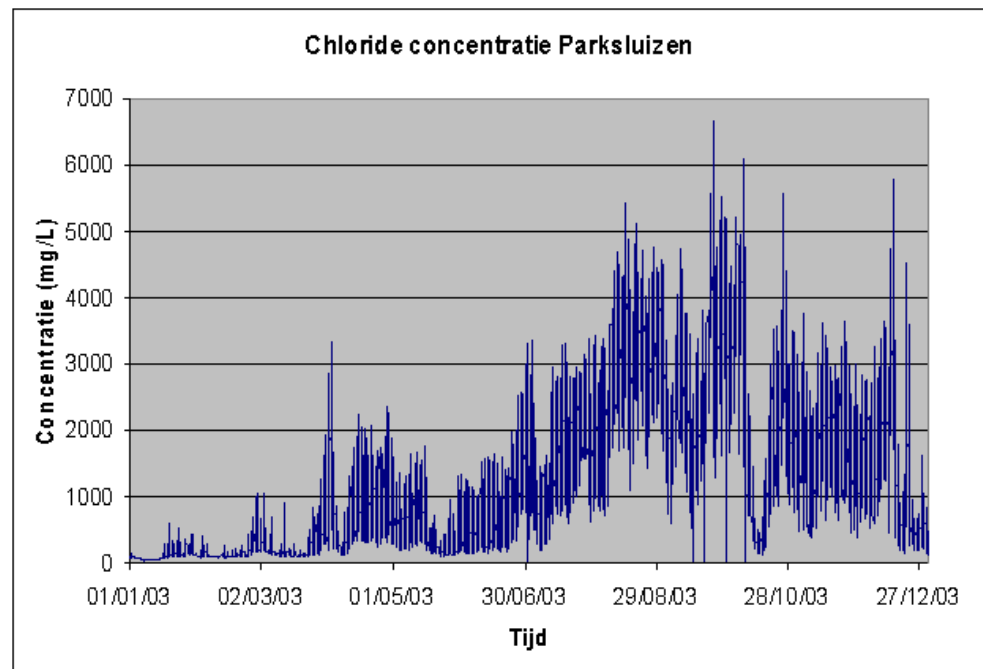
De maximaal toelaatbare concentratie chloride in oppervlaktewater is 200 milligram per liter. Deze waarde wordt in de modelberekeningen voor de locaties één, twee, drie, vijf en zes overschreden. Uit de resultaten blijkt echter ook dat de berekende chloride concentraties voor alle locaties hoger uit komen dan de meetwaarden. Voor locatie drie loopt dit verschil op tot 200 mg/l waarbij de maximale waargenomen concentratie 450 mg/l is. Bij locatie zes zijn de verschillen zelfs groter. Tot 800 mg/l bij een maximaal waargenomen concentratie van 1200 mg/l.

Gezien de grote verschillen tussen meetwaarden en berekende concentraties, kan geconcludeerd worden dat de berekende chlorideconcentraties niet betrouwbaar zijn. Aan de absolute waarden kan dan ook weinig waarde worden gehecht. Belangrijker zijn de verschillen in concentraties die berekend worden voor de verschillende scenario's.

Twee belangrijke factoren zijn van invloed op de berekende chlorideconcentraties voor het oppervlaktewatersysteem. Ten eerste de inlaat van gebiedsvreemd water, wat nabij Parksluizen zeer hoge concentraties heeft, zie Figuur 4.10 (Helpdesk Water, 2008). Daarnaast zijn de zoutconcentraties in de uittredende kwel van invloed. Hier treden zowel concentraties beneden de 35 mg per liter, als ver boven de 200 mg per liter op, zelfs tot boven de 1000 mg per liter. Beide factoren worden als randvoorwaarde aan het SOBEK model opgelegd.

Voor de chloride concentraties in de Nieuwe Waterweg zijn van grote invloed op de waterkwaliteit in het gebied, vooral in het zuidoostelijke deel. Het water stroomt hier binnen als gevolg van schut- en lekverliezen die niet gekwantificeerd zijn en als constante dagflux in het model opgenomen zijn. Dit verklaart waarom de concentratie nabij Parksluizen (locatie 6) niet juist berekend wordt, maar de trend in de metingen is terug te vinden in de berekeningen.

Op bovenstaande onderdelen zou het oppervlaktewater model verbeterd moeten worden om meer betrouwbare uitspraken te kunnen doen.



Figuur 4.10: Gemeten chloride concentraties Nieuwe Waterweg ter hoogte van Parksluizen (Waterdienst, 2008)

Op de locaties één, vier, vijf en zeven treedt de te verwachten trend op:

- de hoogste concentraties worden berekend voor het scenario waarbij de winning wordt gesloten;
- de concentraties vijftig jaar na stopzetting van de winning zijn hoger dan 1 jaar na stopzetting van de winning.

De grotere kwelflux en de over het geheel genomen hogere concentraties van deze fluxen zorgen voor de hogere concentraties in het oppervlaktewater. Op locatie 2 worden juist voor het scenario waarbij de winning over 50 jaar nog werkende pompen heeft, de hoogste concentraties berekend. Dit komt doordat de invloed van instroom van water uit de Nieuwe Waterweg hier nog groot is en waarschijnlijk groter is op het moment dat er minder kwel uittreedt, wat het geval is bij dit scenario. Voor de overige locaties zijn de verschillen gering. In volgende tabel worden de gemiddelde en maximale concentraties weergegeven voor de verschillende scenario's voor de locaties in Figuur 4.1.

Tabel 4.1: Gemiddelde chloride voor scenario's 'winning uit' over 50 jaar, 'winning aan' over 50 jaar vergeleken met de referentie situatie voor die locaties waar de grenswaarde wordt overschreden (locatie 1, 2, 3, 5 en 6). Absolute waarden en verschil percentages t.o.v. referentie situatie

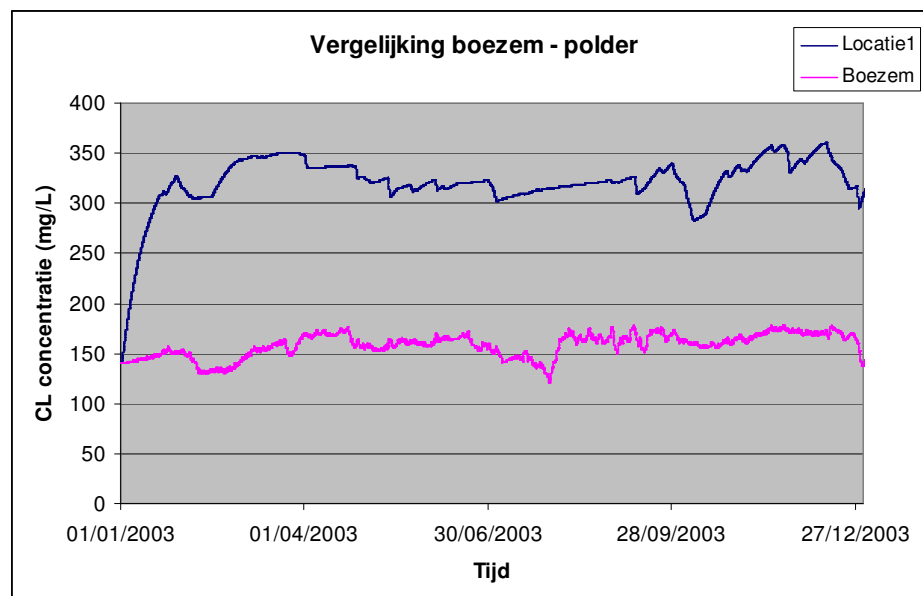
	Locatie1		Locatie2		Locatie3		Locatie5		Locatie6	
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%
<b>Referentie</b>	309,9		177,6		256,0		176,0		437,7	
<b>uit 50</b>	397,5	28,3	169,2	-4,7	258,5	1,0	188,2	6,9	414,7	-5,3
<b>aan 50</b>	303,0	-2,2	175,03	-1,4	255,0	-0,4	173,8	-1,3	438,0	-,1

Tabel 4.2: Maximale chloride voor scenario's 'winning uit' over 50 jaar, 'winning aan' over 50 jaar vergeleken met de referentie situatie voor die locaties waar de grenswaarde wordt overschreden (locatie 1, 2, 3, 5 en 6). Absolute waarden en verschil percentages t.o.v. referentie situatie

	Locatie1		Locatie2		Locatie3		Locatie5		Locatie6	
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%
<b>Referentie</b>	352,3		282,1		467,7		313,3		1180	
<b>uit 50</b>	418,2	18,7	273,0	-3,2	418,0	-10,6	343,1	9,5	1161	-1,6
<b>aan 50</b>	325,9	-7,5	279,4	-1,0	464,4	-0,7	305,0	-2,6	1180	0

Alleen op locatie één en vijf is sprake van een duidelijke stijging. De gemiddelde chloride concentratie stijgt hier respectievelijk 28,3 en 6,9 procent ten opzichte van de huidige situatie, de maximale concentratie 18,7 en 9,5%. De gemiddelde concentraties op locatie 5 blijven echter beneden de grenswaarde van 200 mg/l. Op locaties 2 en 6 is zelfs sprake van een daling van de chloride concentratie. Op deze locaties is de invloed van het water uit de Nieuwe Waterweg groter dan de invloed van de uittredende kwel. Uit bovenstaande blijkt dat alleen op locatie 1, ca. 3 kilometer ten zuidwesten van het DSM terrein gelegen, de chloride concentratie significant stijgt als gevolg van het stopzetten van de winning.

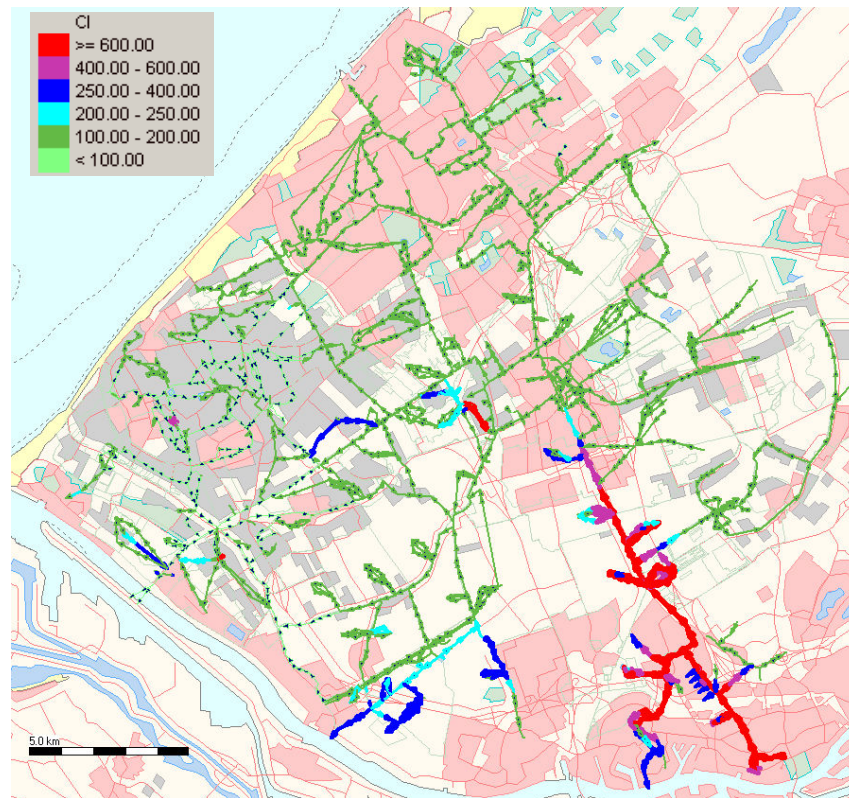
Analyse locatie 1 bevindt zich in een polderwatergang, hier is het effect van uittredende kwel groter dan op de boezem. Figuur 4.11 geeft de chlorideconcentratie weer voor locatie 1 en voor het aangrenzende polder water. Uit de grafiek blijkt dat op de boezem de chlorideconcentratie geen zorgelijke waarden aanneemt.



Figuur 4.11: Vergelijking chloride concentraties polder en boezem watergang nabij locatie 1

## 4.2 Ruimtelijke spreiding

De ruimtelijke spreiding van de chloride concentraties is voor alle scenario's vrijwel gelijk. Als voorbeeld zijn hier de ruimtelijke resultaten van de chloride opgenomen voor de situatie over 50 jaar waarbij de winning is gesloten.



Figuur 4.12: Maximale berekende chloride concentraties voor het scenario 'winning uit' over 50 jaar.

De hoogste chloride concentratie komen voor in de Schie. Rond gemaal Parksluizen lopen deze op tot bijna 1200 mg/l in de richting van Delft nemen deze geleidelijk af tot beneden de 200 mg/l.

Opvallend zijn de hoge concentraties in het zuidzuidwesten van het gebied.

Concentraties in het oppervlaktewater lopen hier op tot boven de 400 mg/l. Te verwachten valt dat de invloed van de winning op deze afstand gering is. De hoge oppervlaktewaterconcentraties worden veroorzaakt doordat de chloride concentraties in de fluxen uit het stofstromenmodel voor dit gebied hoger zijn. Uit metingen is gebleken dat de chloride aan de onderkant van de deklaag in dit gebied waarden aannemen tussen de 2000 en 5000 mg/l (Roelofsen et al, 2006). Dit verklaart dat ook de, met het stofstromenmodel berekende, concentraties in dit gebied hogere waarden aannemen. Ook uit bovenstaande kaart blijkt dat op circa 15 kilometer ten zuidwesten van Delft (locatie 1, Figuur 4.1) de chloride concentratie zeer hoge waarden aanneemt. Wanneer naar de resultaten van het grondwater stofstromenmodel wordt gekeken, blijkt dat nabij deze locatie de maximale chloride concentratie in de grondwater flux optreedt.

### 4.3 Waterbalansen

De opgelegde randvoorwaarden voor de modelberekeningen, voor het referentie scenario en het scenario waarbij de winning is gesloten over 50 jaar, zijn vrijwel gelijk. Alleen de laterale fluxen vanuit het grondwater zijn verschillend. Tabel 4.3 geeft de waterbalansen voor de twee scenario's hieruit blijkt dat het verschil tussen de netto

kwelflux 6,1 miljoen m<sup>3</sup> bedraagt. Dit heeft als gevolg dat meer water het gebied over de grenzen en de kunstwerken op deze grenzen het gebied verlaat.

Tabel 4.3: Waterbalans scenario 'winning uit' 50 jaar en referentie

	Referentie miljoen m <sup>3</sup>	Uit miljoen m <sup>3</sup>
<b>Grenzen in</b>	60,1	60,1
<b>Grenzen uit</b>	0,5	0,5
<b>Kunstwerken in</b>	0,0	0,0
<b>Kunstwerken uit</b>	102,7	108,8
<b>Lateraal in</b>	75,5	79,3
<b>Lateraal uit</b>	33,5	31,2
<b>Berging</b>	-1,1	-1,1
<b>Volume fout</b>	-1,13 x 10 <sup>-6</sup>	-0,85 x 10 <sup>-6</sup>
Netto lateraal in	42,0	48,1





## 5 Conclusies

1. Over het algemeen zijn de berekende effecten van het stopzetten van de winning op de chlorideconcentratie in het oppervlaktewater gering.
2. Het model is niet geschikt om uitspraken te doen over de absolute waarden van de chloridegehalten in het oppervlaktewater. Het model is wel geschikt om een indruk te geven van de grootteorde van het effect van voorgenomen maatregelen.

Deze conclusies kunnen getrokken worden op basis van de met SOBEK berekende chlorideconcentraties van het oppervlaktewater. Hoewel de absolute berekende waarden soms veel afwijken van de gemeten waarden, tonen de resultaten wel aan dat op vrijwel alle locaties de verschillen tussen de berekende chlorideconcentraties voor de verschillende scenario's klein zijn.

Slechts op één van de analyse locaties treedt een merkbare stijging van de chlorideconcentratie op (28%), die ook zorgt voor chlorideconcentraties in het oppervlaktewater van boven de 200 mg/l, zie Tabel 4.2. Dit betreft locatie één. De genoemde locatie bevindt zich in een polder. Uit de analyse is gebleken dat de chlorideconcentraties in de polderwatergangen in gebieden waar kwel uittreedt hoger zijn dan in de nabij gelegen boezem. Op de boezem nabij deze locatie blijft de chlorideconcentratie beneden de 200 mg/l.

Op vijf van de zeven locaties komen chlorideconcentraties boven de grenswaarde van 200 milligram per liter voor. De hoogste concentraties treden op nabij gemaal Parksluizen en in de Schie. Dit is echter het gevolg van de schut- en lekverliezen die optreden nabij Parksluizen. Door deze verliezen stroomt water van de Nieuwe Waterweg, met zeer hoge chlorideconcentraties, het gebied binnen. De chlorideconcentraties in de boezem worden vele malen meer beïnvloed door de lekverliezen bij de Parksluizen dan door het stopzetten van de winning.

Voor die locaties waar meetwaarden beschikbaar zijn blijkt het SOBEK model hogere concentraties te berekenen dan de gemeten waarden. De berekende chlorideconcentraties worden alleen beïnvloed door de opgelegde randvoorwaarden die ofwel verkregen zijn uit metingen van Delfland en Rijkswaterstaat, ofwel berekend zijn met behulp van het stoftransportmodel grondwater. Een betere benadering van de meetwaarden kan niet verkregen worden door calibratie, aangezien deze randvoorwaarden berekend of gemeten zijn en niet gewijzigd dienen te worden. Daardoor zijn de berekende absolute chlorideconcentraties minder betrouwbaar.

## 6 Referenties

- Roelofsen, F et al., 2006. Onderzoek naar effect van stopzetting grondwater onttrekking DSM Delft. Fase 1: Monitoringstrategie voor geotechniek, wateroverlast en waterkwaliteit. WL | Delft Hydraulics, TNO en GeoDelft.
- Helpdesk Water, Rijkswaterstaat Waterdienst, 2008. <http://www.helpdeskwater.nl/>
- Bakkum, Ronald, 2008. Mondelinge communicatie en mail wisseling

## Deel V – Geotechnisch Model

Deel V van dit technische rapport beschrijft de totstandkoming van het numerieke model en de stappen waarmee vervolgens de geotechnische aspecten van winningreductie zijn bepaald.

De eerste vier hoofdstukken beschrijven de onderdelen van het numerieke model waaronder de opbouw van de ondergrond en de modelparameterisatie. In hoofdstuk 5 komen de modeluitkomsten aan de orde. Wat de effecten van de berekende rijzing zijn op panden in het gebied komt in hoofdstuk 6 aan de orde. Hoofdstuk 7 geeft vervolgens een prognose van de schade die de basis is geweest voor het hoofdstuk Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA) in het hoofdrapport. Het slothoofdstuk beschrijft de uitkomsten van de controleberekeningen die zijn uitgevoerd.



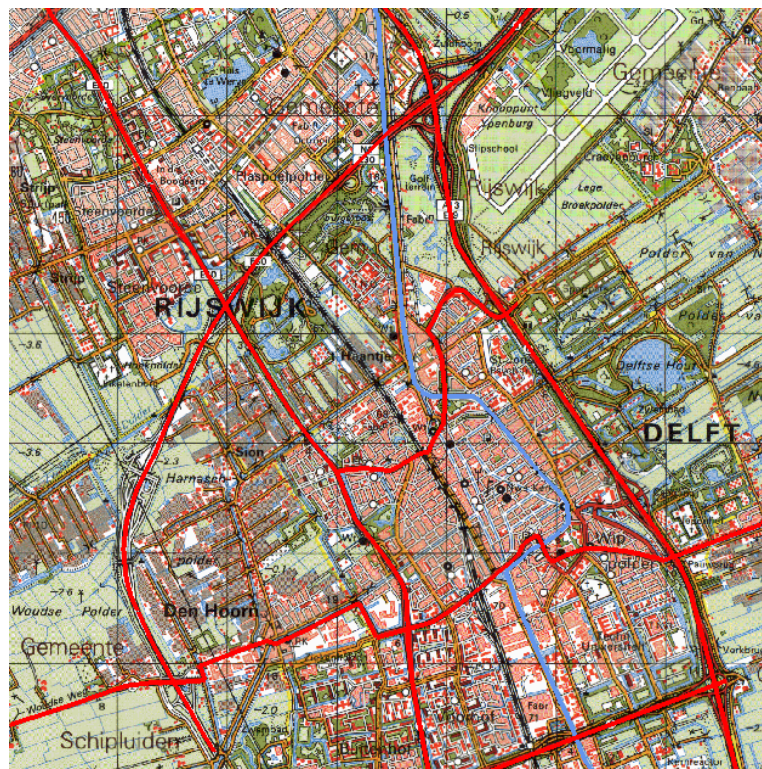
# 1 Geotechnisch Model

## 1.1 Inleiding

Veranderingen in de grondwaterstroom ten gevolge van het (gedeeltelijk) stopzetten van de winning en de daarmee gepaard gaande grondwaterstanden zullen in daarvoor gevoelige gronden leiden tot bodembeweging. De maximale beweging kan berekend worden door de verandering als instantaan te beschouwen, zowel van het ondiepe als van het diepe grondwater. Wanneer we voor iedere modelcel deze grondwaterstanden als input beschouwen kan voor iedere cel de betreffende bodembeweging worden voorspeld. Dit kan voor ieder pompscenario worden uitgevoerd.

## 1.2 Omvang gebied

De effecten van de maatregelen op de ondergrond zijn berekend voor een gebied van 7x7 km met de onttrekking als centrum. Dit gebied komt ongeveer overeen met het gebied waarbinnen de stijghoogteverandering bij volledige stopzetting groter is dan 1 meter. In dit gebied is een detaillering van het globale ondergrond uitgevoerd, waarbij naast de boringen en sonderingen in DINO gebruik is gemaakt van de datasets van de gemeente Rijswijk en de gemeente Delft, het geotechnisch onderzoek voor de spoorzone en het geotechnisch archief van GeoDelft. De detaillering heeft geresulteerd in een voxelgrid met elementen van 25x25x0,25 m. De omvang van het grid is 280x280x90 (x/y/z) cellen. De boven en onderkant van het model zijn resp. NAP+2,38 en NAP -20,13 m. De onderkant ligt volledig in het pleistocene watervoerende pakket.



Figuur 1.1: Omvang modelgebied



## 2 Beschrijving ondergrond

### 2.1 Geologische gegevens

Het ondergrondmodel is samengesteld aan de hand van de bestaande boor- en sondeergegevens die beschikbaar zijn in DINO (Data en Informatie Nederlandse Ondergrond). DINO is de centrale geologische database van Nederland die beheerd wordt door TNO. Bij de gebruikte boringen is onderscheid gemaakt tussen handboringen en boringen die zijn gezet met behulp van mechanische systemen (counterflush, luchtlift, puls, steek). De handboringen reiken meestal niet dieper dan 5 à 6 meter onder maaiveld. Ze geven echter een zeer gedetailleerd beeld van dit traject, waardoor identificatie van enkele centimeters dikke laagjes mogelijk is. De mechanische boringen (met uitzondering van steekboringen) leveren veelal verstoorde monsters en geven daarom vaak een minder gedetailleerd beeld van de lithologische samenstelling van de lagen. Mechanische boringen hebben een groter dieptebereik dan handboringen, soms tot enkele honderden meters diep.

Naast van geologische puntdata is gebruik gemaakt van beschikbare geologische kaartinformatie uit de systematische geologische kartering van de voormalige Rijks Geologische Dienst (RGD; kaartblad 37W, Van Staalduinen, 1979; en kaartblad 30W, ongepubliceerd), geomorfologische informatie verkregen uit de AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland en informatie uit diverse TNO-onderzoeken in de omgeving). Voor het bepalen van de ligging van het pleistocene oppervlak is verder gebruik gemaakt van de sonderingen in de archieven van de gemeenten Rijswijk en Delft.

## 2.2 Modelling

De bij dit onderzoek gehanteerde aanpak is schematisch weergegeven in Figuur 2.1. De onderscheiden hoofdstappen zijn:

### Stap 1

Selectie en kwaliteitscontrole van boorgegevens en overige geologische informatie.

### Stap 2

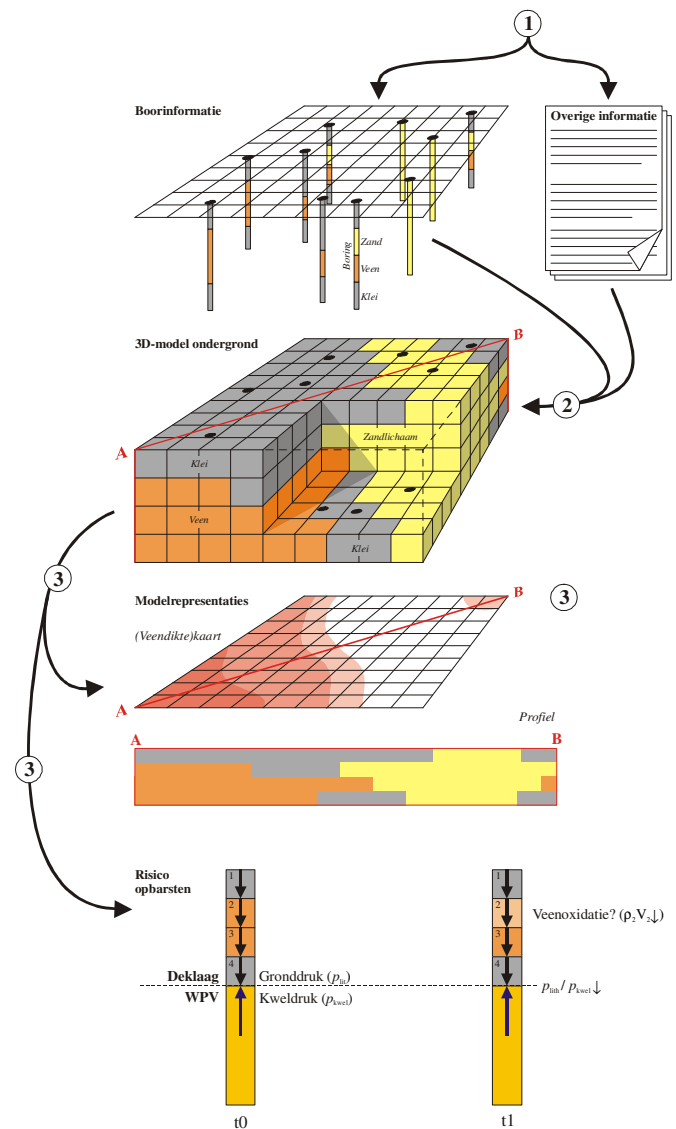
Vervaardigen van een voxelmodel ("3D-gridcellenmodellen"; celattributen zijn gebaseerd op (geïnterpoleerde) boorgegevens;

### Stap 3

Indeling in geotechnische eenheden en parameterisatie. Vervaardigen ascii-grids voor de bodemdalingsberekening;

### Stap 4

Scenariostudie naar de bodemdaling, waarbij de veenoxidatie, compactie of zwel ten gevolge van het af- of toenemen van de kweldruk in het watervoerend pakket en de grondwaterdiepte als randvoorwaarden dienen



Figuur 2.1: Opzet van dit onderzoek

De weergegeven laagopbouw is verkregen door correlatie en interpretatie van de boorgegevens, waarbij tevens gebruik is gemaakt van beschikbaar geologisch kaartmateriaal. Zo is bijvoorbeeld de ligging van de geulsystemen direct onder het maaiveld afgeleid van de geologische kaarten en van de archeologische kaart van de gemeente Delft.



### 2.3 Beschrijving van de ondergrond

De ondergrond bestaat uit een stapeling van Holocene afzettingen, gelegen op een Pleistoceen substraat. Alle veenlagen worden tegenwoordig gerekend tot de Formatie van Nieuwkoop (voorheen onderdeel van de *Westland Formatie*; Zagwijn & Van Staaldunen, 1975). De veenlaag aan de basis van de Holocene afzettingen, gelegen op de Pleistocene afzettingen, wordt het Basisveen genoemd en de veenlagen binnen het Holocene pakket worden Hollandveenlagen genoemd.

De mariene Holocene afzettingen in de Nederlandse kustvlakte worden gerekend tot de Formatie van Naaldwijk (voorheen *Westland Formatie*). De kustduinen, de strandwallen en strandvlakte afzettingen behoren eveneens tot deze formatie.

De mariene kleilagen boven de Hollandveenlaag ('hoofdlaag') behoren volgens de nieuwe stratigrafische indeling tot het Laagpakket van Walcheren (voorheen *Afzettingen van Duinkerken*) en de blauwgrijze klei onder de dikke Hollandveenlaag wordt tegenwoordig gerekend tot het Laagpakket van Wormer (voorheen *Afzettingen van Calais*).

Het watervoerend pakket dat de basis vormt van het bodemdalingsmodel wordt gevormd door afzettingen die bestaan uit grove, soms grindhoudende zanden (Formatie van Kreftenheye, ongedifferentieerd). Dit zijn rivierafzettingen die dateren uit de laatste ijstijd. Na deze eenheid is over het toenmalige oppervlak een kleilaag afgezet, de Laag van Wijchen genoemd. Door bodemvormende processen (met name kleiverplaatsing / zetting) heeft deze kleilaag een stug karakter gekregen, daarmee onderscheid hij zich van jongere kleilagen. Deze fase van kleisedimentatie wisselde af met een periode waarin rivierduinen werden gevormd uit de onderliggende grove rivierzanden: deze duinen worden het Laagpakket van Delwijnen genoemd. Waar aanwezig kan de top van dit laagpakket op korte afstand sterk variëren.

Na de Laat Glaciale – Vroeg Holocene fase ontstond de Basisveenlaag, een laag compact veen van meestal minder dan één meter dikte. Hierop vormde zich in brak lagunair milieu een kleilaag van maximaal 2m dik (Laag van Velsen). De top hiervan bevindt zich rond de 16 / 17 m -NAP. Hierna (naar boven toe in de sedimentkolom) nam het energieniveau van het afzettingsmilieu toe en werden mariene getijde-afzettingen gevormd (Formatie van Naaldwijk). Het diepliggende klei/zand complex (ca. 10 – 17 m -NAP) wordt aan de bovenkant afgesloten met een eenheid waarin veenlagen veelvuldig voorkomen (Hollandveenlagen). De veenlagen worden onderbroken door klastische (zandige klei en klei) lagen. Dit complex van afzettingen is gevormd in een zoet-brak tot marien getijde-milieu.

De bovengrond wordt bepaald door het voorkomen van afzettingen van de Gantel. In het gebied rond Delft zijn de Gantel lagen bewaard gebleven als de afdekkende lagen die aan maaiveld liggen. Ze zijn gevormd in een brakwatermilieu. Er komen getijde-kreken voor (gevormd in een kweldermilieu), die op de AHN kaarten duidelijk te zien zijn. Deze zijn zandig ingevuld, minder compactiegevoelig en steken dus nu als ruggetjes boven het omliggende kleidek uit (zogenaamde 'inversieruggen'). De hoogste ruggen zijn de meest zandige en vaak ook grotere geulsystemen. Deze kreken duiden op een actieve getijde-werking tijdens de vorming van deze laag. Buiten de kreken zijn de afzettingen in een 'rustig' overstromingsmilieu gevormd (gebied dat periodiek onderwater liep) en bestaan uit slappe klei.

Jaren voor heden	Tijd-stratigrafie	Lithostratigrafische eenheden
0	Holoceen	Formatie van Naaldwijk / Formatie van Nieuwkoop
11.500		Laag van Wijchen Form. van Boxtel / Laagpakket van Delwijnen
120.000	Weichselien (Pleistoceen)	Formatie van Kreftenheye ongedifferentieerd

Figuur 2.2: Stratigrafische tabel

De totale dikte van het Holocene pakket varieert tussen de 15 m en 17 m. Het totale pakket bestaat overwegend uit kleilagen die afgewisseld worden door veenlagen. Binnen de kleilagen komen zandiger trajecten voor die in de profielen zijn aangegeven met zandige facies (code k/zk en zk) en sterk zandige facies (zk / z). De zandige facies bestaan overwegend uit zand/klei gelaagde afzettingen. Op korte afstand kan de verhouding zand/ kleilaagjes sterk wisselen.

Ten behoeve van de geotechnische berekeningen van de gevolgen voor de zetting/rijzing van de verschillende scenario's is het geologische voxelmodel geschematiseerd in lithologische eenheden met onderscheiden samendrukkingseigenschappen. De parameterisatie wordt in de volgende paragraaf beschreven.

### 3 Modelparameterisatie

Voor de parameterisatie is gebruik gemaakt van de sonderingen en geomechanische gegevens in DINO, het geotechnisch onderzoek voor de spoorzone en het geotechnisch archief van Deltares Geo-engineering (voorheen GeoDelft).

Dit heeft geresulteerd in een indeling in 21 ondergrondtypen met bijbehorende samendrukkingsparameters.

Tabel 3.1: Overzicht samendrukkingsparameter

Naam	$\gamma_{\text{nat}}$	$C_p$	$C_s$	$C_{p'}$	$C_{s'}$	$C_v$	$P_g$	$v_{\text{ox}}$	$A_p$	$A_s$
Zand 1	18	200	4000	100	1000	7.00E-05	50	0	200	4000
Zand 2	18	200	4000	100	1000	7.00E-05	50	0	200	4000
Zand 3	19	200	4000	100	1000	5.00E-05	75	0	200	4000
Zand 4	20	200	4000	100	1000	1.00E-05	100	0	200	4000
Zand, kleiig 1	17	100	2000	70	900	1.00E-06	50	0	100	2000
Zand, kleiig 2	17	100	2000	70	900	1.00E-06	50	0	100	2000
Zand, kleiig 3	17.5	100	2000	70	900	1.00E-06	75	0	100	2000
Zand, kleiig 4	20	100	2000	70	900	1.00E-06	100	0	100	2000
Klei 1	15	40	400	10	60	2.00E-07	50	0	40	400
Klei 2	15	40	400	10	60	2.00E-07	50	0	40	400
Klei 3	15	40	400	10	60	5.00E-09	50	0	40	400
Klei 4	16	75	600	20	100	6.00E-07	75	0	75	600
Klei 5	18	80	1000	50	600	5.00E-08	100	0	80	1000
Veen 1	10	80	200	9	20	1.00E-08	50	0.015	80	200
Veen 2	10	60	70	6	50	1.00E-07	50	0.015	60	70
Veen 3	11	60	70	6	50	1.00E-06	75	0.015	60	70
Veen 4	12	100	700	10	50	5.00E-07	100	0.015	100	700
Veen, kleiig 5	11	60	70	6	50	2.00E-07	50	0.015	60	70
Veen, kleiig 6	11	100	700	10	50	5.00E-09	50	0.015	100	700
Veen, kleiig 7	12	100	700	10	50	6.00E-07	75	0.015	100	700
Veen, kleiig 8	13	90	700	15	60	5.00E-08	100	0.015	90	700

#### 3.1 Geotechnische gegevens en betrouwbaarheid

De voor de zettingsberekeningen benodigde parameters zijn afkomstig van projecten met een beperkte dekking van het gehele model. Het betreft gegevens van de spoorzone, Technopolis, A4 en A13 en de stadsuitbreiding Tanthof. Alle beschikbare gegevens zijn in een verzameling gebracht en gesorteerd op de bovenstaande hoofdlithologieën. De onderverdeling binnen de hoofdlithologie is gemaakt op basis van de variatie van de parameters met de diepte. Er is gebruik gemaakt van de gemiddelde waarden van de puntenwolken uit de grondonderzoeken. Door ruimtelijke variatie en de marges die inherent zijn aan het grondonderzoek zelf is het aannemelijk dat er afwijkingen kunnen voorkomen van +/- 10%.



## 4 Berekingsmethoden

De reactie van de bodem op de verschillende pompsenario's van de winning in termen van bodembeweging worden bepaald door de verandering van de spanningen in de grond. Deze veranderen als gevolg van de waterdruk in de poriën, die bepaald wordt door de grondwaterstanden en de hydraulische weerstand van de respectievelijke lagen. In dit rapport worden slechts de hoofdlijnen van de methodologie genoemd, voor een uitgebreide beschrijving wordt verwezen naar Bremmer e.a. (2000).

*Zetting* treedt op bij peilverlaging door afname van de waterdruk in het sediment. Dit proces is geprognosticeerd met de volgende formule, naar Koppelman (1948):

$$\frac{\Delta h_t}{h} = \left( \frac{U(\Delta t)}{C_p} + \frac{1}{C_s} \log \frac{\Delta t}{\Delta t_d} \right) \ln \left( \frac{\sigma'_i + \Delta \sigma'}{\sigma'_i} \right)$$

met:  $h$  = dikte grondlaag;  $\Delta h_t$  = totale samendrukking (m),  $\Delta h_t/h$  = relatieve samendrukking;  $U$  = consolidatiegraad,  $C_{p,s}$ ; zie Tabel 3.1,  $\sigma'_i$  = initiële korrelspanning (kPa),  $\Delta \sigma'$  = toename korrelspanning,  $\Delta t$  = duur van de belasting,  $\Delta t_d = 1$  dag (referentieperiode).

Naast zetting bij peilverlaging wordt hiermee ook opheffing bij peilverhoging berekend. Dit proces treedt op als gevolg van verhoging van de waterspanning in het sediment, waardoor het uitzet.

*Veenoxidatie* is berekend met:

$$\Delta h = h_{droog} \cdot (1 - e^{-V_{ox} \cdot \Delta t})$$

met:  $h$  = dikte grondlaag (m);  $h_{droog}$  = dikte droogliggend veen;  $\Delta h$  = dikteverandering door veenoxidatie (m),  $V_{ox}$  = veenoxidatiesnelheid = 15 mm per m drooglegging per jaar,  $\Delta t$  = oxidatieduur (jr).

Om de gevolgen van de pompsenarios weer te geven is de situatie berekend in stationaire toestand, dat wil zeggen dat een toestand is berekend nadat alle effecten ten gevolge van de debietveranderingen volledig zijn uitgewerkt. In het algemeen kan worden aangenomen dat dit zo is na een periode van 30 jaar (10.000 dagen) na de verandering. In de praktijk zal de aanpassing van de grond aan de nieuwe situatie in het begin het snelst plaatsvinden en logaritmisch afnemen.

De waterspanningstoestand en daarmee de grondspanning in iedere modelcel wordt verkregen door de stijghoogteuitvoer van de MODFLOW berekeningen voor het tijdstip van 30 jaar na het begintijdstip van iedere cel te koppelen aan het ondergrondmodel.



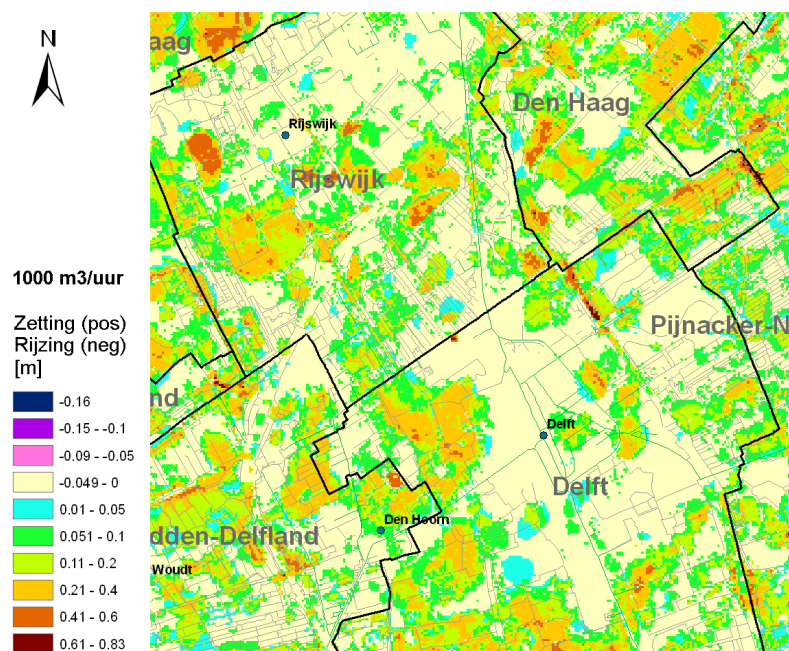
## 5 Modeluitkomsten

De verandering van maaiveldhoogte is berekend voor vier met MODFOW berekende scenario's:

- 1400 m<sup>3</sup>/uur (huidig debiet – winning aan);
- 1.000 m<sup>3</sup>/uur;
- 800 m<sup>3</sup>/uur;
- 0 m<sup>3</sup>/uur (winning uit).

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven als hoogteverschillen ten opzichte van de huidige hoogte van het maaiveld. Hierbij is zowel het totale effect beschouwd als onderscheid gemaakt met betrekking tot de afzonderlijke processen die plaatsvinden, met name zetting/rijzing en veenoxidatie. De uitkomsten zijn de waarden die na ca. 30 jaar zijn bereikt.

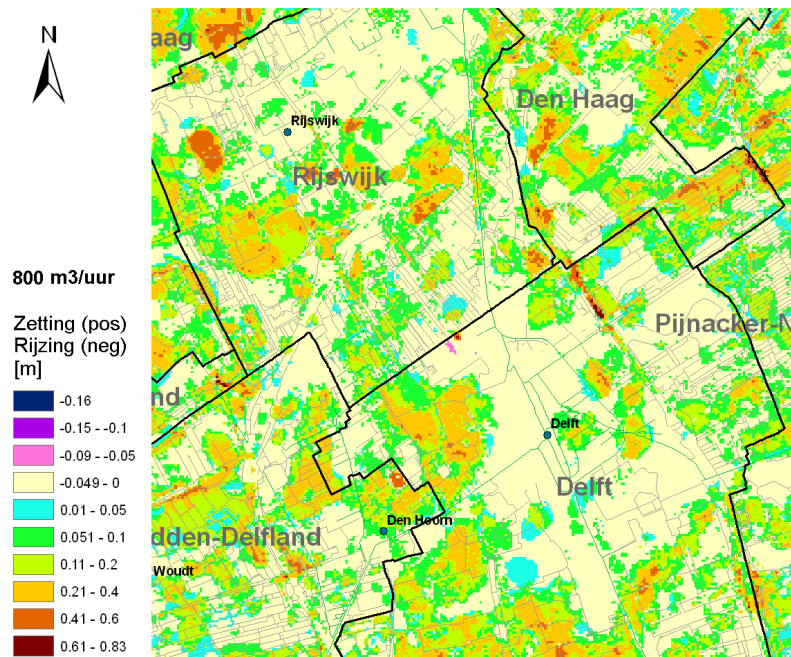
Voor ieder scenario zijn weergaven gemaakt van de zetting/rijzing, de oxidatie en het totale effect.



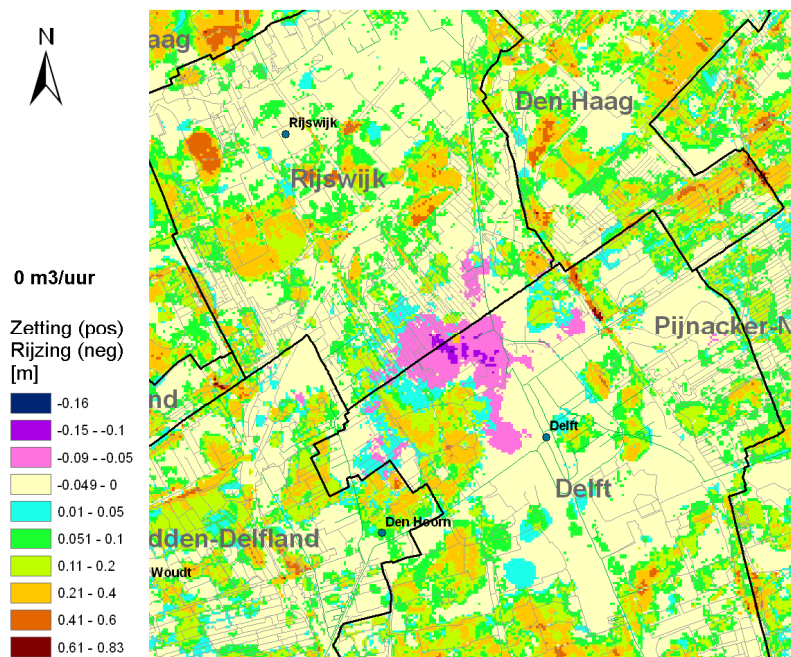
Figuur 5.1: Effect van winningreductie bij 1.000 m<sup>3</sup>/uur (positief=zetting, negatief=rijzing)

Uit de resultaten komt naar voren dat de maaiveldbeweging in het gehele gebied, met uitzondering van een beperkte zone rond de onttrekking op veel plaatsen zetting vertoont (globaal tot ca. 0,40 m). Dit is een gevolg van de oxidatie die plaatsvindt zolang zich veenlagen boven de grondwaterstand bevinden. Door het opkomen van de grondwaterstand bij afnemend debiet wordt de oxidatie wel minder dan in de huidige situatie. Het meest evidente gevolg van de debietvermindering is de rijzing, die volgens verwachting de grootste waarden bij de onttrekking vertoont.

Wat vervolgens het effect van deze bodembeweging op de stabiliteit van panden is wordt uitgebreid toegelicht in paragraaf 7.1.



Figuur 5.2: Effect van winningreductie bij 800 m<sup>3</sup>/uur (positief=zetting, negatief=rijzing)



Figuur 5.3: Effect van winningreductie bij sluiting (positief=zetting, negatief=rijzing)



## 6 Geotechnische effecten van winningreductie

### 6.1 Optredende grondmechanische mechanismen

Door de stopzetting van de winning treden geohydrologische effecten op in de ondergrond. In dit kader zijn de volgende aspecten beschouwd:

- stijging van de freatische grondwaterstand;
- stijging van de stijghoogte in tussenzandlagen in het pakket van holocene afzettingen;
- stijging van de stijghoogte van het grondwater in de pleistocene zandlaag.

In geotechnisch opzicht is sprake van verschillende fenomenen die zich ontwikkelen als gevolg van die veranderingen van de waterspanning in de ondergrond:

1. rijzing ten gevolge van het terugveren van de samendrukbare lagen bij het afnemen van de grondmechanische belasting door waterdruk;
2. afname van de korrelspanning onder funderingselementen (onder de strook van staalfunderingen);
3. afname van de korrelspanning onder funderingselementen (onder de punt van funderingspalen);
4. wijziging van de schachtwrijving langs funderingspalen (afname van negatieve kleef of ontwikkeling van positieve kleef);
5. toename van de opwaartse grondwaterdruk onder funderingen en kelderconstructies.

#### Ad 1 Maaiveldrijzing

De ruimtelijke verdeling van de rijzing is berekend met een ondergrondmodel dat samengesteld is door Deltares Unit Bodem en Grondwatersystemen te Utrecht. De beoordeling van effecten is verricht door Deltares Unit Geo-engineering te Delft. De rijzing wordt veroorzaakt door een proces van deconsolidatie (inverse consolidatie). De aanwezige belasting op de grondlagen wordt gevormd door de onderdruk onder de samendrukbare lagen vanwege de lage stijghoogte in het pleistocene zand ten gevolge van de onttrekking. Bij het veranderen van de waterdruk door het stoppen van de onttrekking zwelt de grond enigszins (geringe terugvering) waarbij de toenemende porieruimte met grondwater wordt gevuld.

De verdeling van de rijzing over het gebied is afhankelijk van de mate van verandering van de waterspanning en van de heterogeniteit van de afzettingen.

Verschillen op diverse locaties wat betreft de mate van zwel hangen globaal samen met verschillen in bodemopbouw waarbij een verschil in de dikte van lagen in het kwadraat doorwerkt.

De snelheid van zwellen hangt ook af van de aanwezigheid van zandlagen in het holocene pakket. Hoe dikker een pakket samendrukbare lagen is, des te langer de deconsolidatie duurt.

Er is dus niet alleen sprake van ruimtelijke verschillen in de totale omvang van de rijzing maar ook van ruimtelijke verschillen in de rijzingsnelheid.

Op dit aspect zal verderop in dit hoofdstuk worden ingegaan.

#### Ad 2 Staalfundering

Afname van de korrelspanning onder staalfunderingen bij stijging van de freatische grondwaterstand leidt tot vermindering van de draagkracht van de ondergrond. Hierdoor kunnen zakkingen optreden.

De verhoging van de freatische grondwaterstand treedt op in het gehele gebied waar de diepe stijghoogte door het wijzigen van de onttrekking verandert. Globaal beschouwd strekt het verschijnsel zich uit over een groot gebied maar er is waarschijnlijk ook sprake van zeer lokale verschillen. Nabij open water kan de grondwaterstijging getemperd worden door de kunstmatig beheerste peilen maar in binnenterreinen zal dat veel minder het geval zijn.

Bij de beoordeling van de effecten op de draagkracht van funderingen is het lastig om de bovenbelasting die vanuit de funderingen aan de ondergrond wordt overgedragen in rekening te brengen. Waarschijnlijk is sprake van belastingsverschillen over de lengte en breedte van de panden.

#### Ad 3 en 4 Paalfundering

Wat betreft paalfunderingen kan de zakking door afname van de puntweerstand enigszins worden gecompenseerd door de ontwikkeling van extra positieve kleef als gevolg van de verandering van de schachtwrijving.

#### Ad 5 Toenemende grondwaterdruk

Door stijging van de grondwaterstand kan de opwaartse waterdruk onder funderingsplaten toenemen. Als gevolg daarvan bestaat het gevaar dat kelders gaan opdrijven.

Het moge duidelijk zijn dat de exacte uitwerking van de verandering van de grondwaterdrukken op de geotechnische situatie complex is door de diverse naast elkaar optredende fenomenen. Een complete uitwerking kost meer tijd en geld dan in het kader van dit onderzoek beschikbaar is. Bovendien is de uitwerking altijd locatiespecifiek (op de schaal van een pand of bouwblok).

## 6.2 Opbouw van model voor bepaling van rijzingseffecten

In het kader van dit onderzoek is getracht om op basis van globale ruimtelijke data een schatting te maken van de ernst van de effecten. Daarbij is het grootschalige ondergrondmodel als basis genomen.

De verdeling van de rijzing over het gebied is afhankelijk van de mate van verandering van de waterspanning en van de heterogeniteit van de afzettingen.

De verandering van de waterspanning hangt samen met de verandering van de stijghoogte in het watervoerende pakket (ongeveer 8 m rond de winning tot 2 m op 2,5 km afstand daarvan).

De ruimtelijke verdeling van de rijzing is berekend met een ondergrondmodel. Een model kent beperkingen door de gelimiteerde hoeveelheid aan beschikbare data die gebruikt kunnen worden om dit model op te baseren. De maximale nauwkeurigheid die gehaald kon worden om de heterogeniteit van de ondergrond met het model in beeld te brengen, is bereikt door de geschatte grondsamenstelling in vakken van 25x25 m<sup>2</sup> met 0,25 m dikte in te voeren. Deze samenstelling is geïnterpoleerd uit beperkt beschikbare

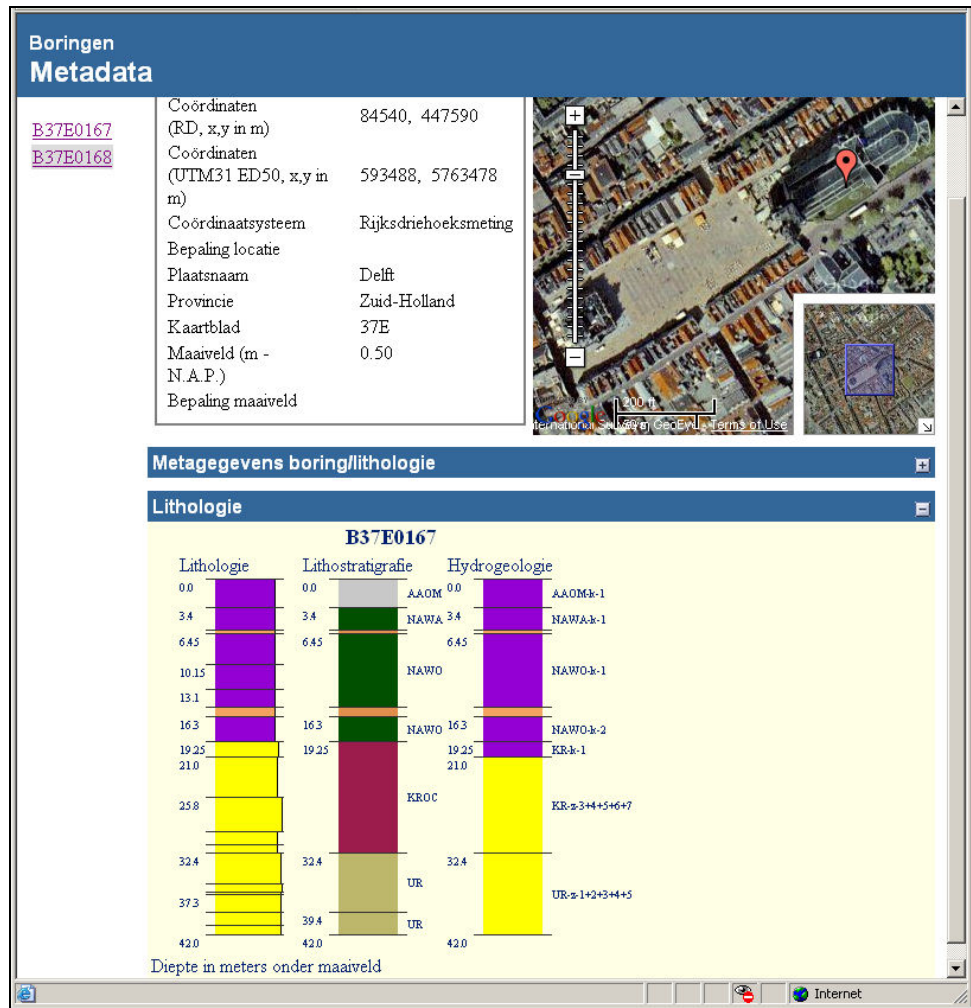
data van grondonderzoek. Er diende dus nog veel geologische interpretatie te worden toegevoegd.

Het geologisch ondergrondmodel is opgebouwd met gegevens uit de DINO-database en aangevuld met beschikbare digitale sonderingen. Een voorbeeld van beschikbare data is gepresenteerd in Figuur 6.1.

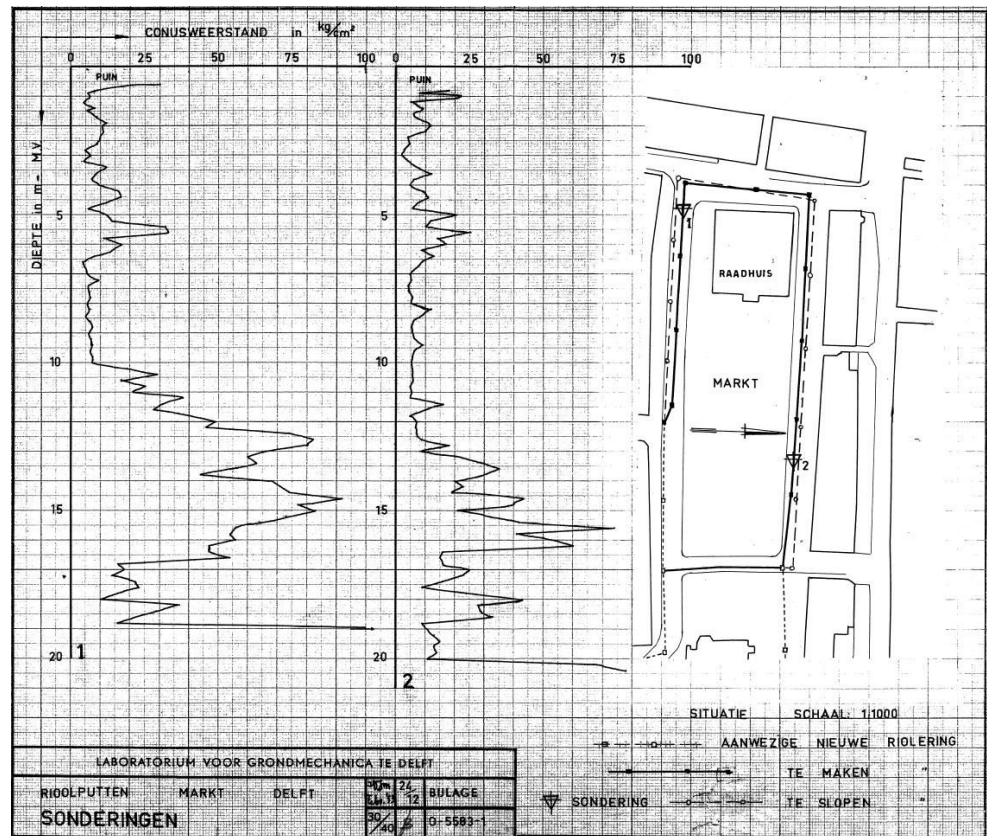
De dichtheid van de gegevens is echter nog beperkt als de mogelijke variatie vanwege heterogeniteit wordt beschouwd. Verder kunnen er interpretatieverschillen een rol spelen. Dit kan worden toegelicht aan de hand van enkele metingen op de locatie van de Markt in Delft. In de volgende figuur is de informatie uit DINO te vinden met een boorbeschrijving. De bodemlagen in het holocene pakket tot een diepte van circa 19 m zijn in de lithologie en geohydrologie voornamelijk als klei aangeduid met de kleur paars. Volgens de informatie in DINO over dit bodemprofiel is de kleilaag tussen 10 en 13 m onder maaiveld sterk zandig.

In oude archieven zijn sondeergrafieken teruggevonden die vanwege de ouderdom niet in het ondergrondmodel konden worden opgenomen (Figuur 6.2). Uit deze grafieken van twee sonderingen op een afstand van 100 m is echter wel af te lezen dat bijvoorbeeld onder de locatie Markt resten van een geulopvulling of zandige banen in het holoceen aanwezig zijn waaruit zeer lokale verschillen kunnen worden afgeleid. Uit de sonderingen komt naar voren dat dit eerder kleiige zandafzettingen zijn dan zandige kleipakketten.

Het is waarschijnlijk dat veranderingen van waterspanningen in zandige holocene lagen tamelijk snel doorwerken. Dit heeft effect op het proces van de optredende rijzing.



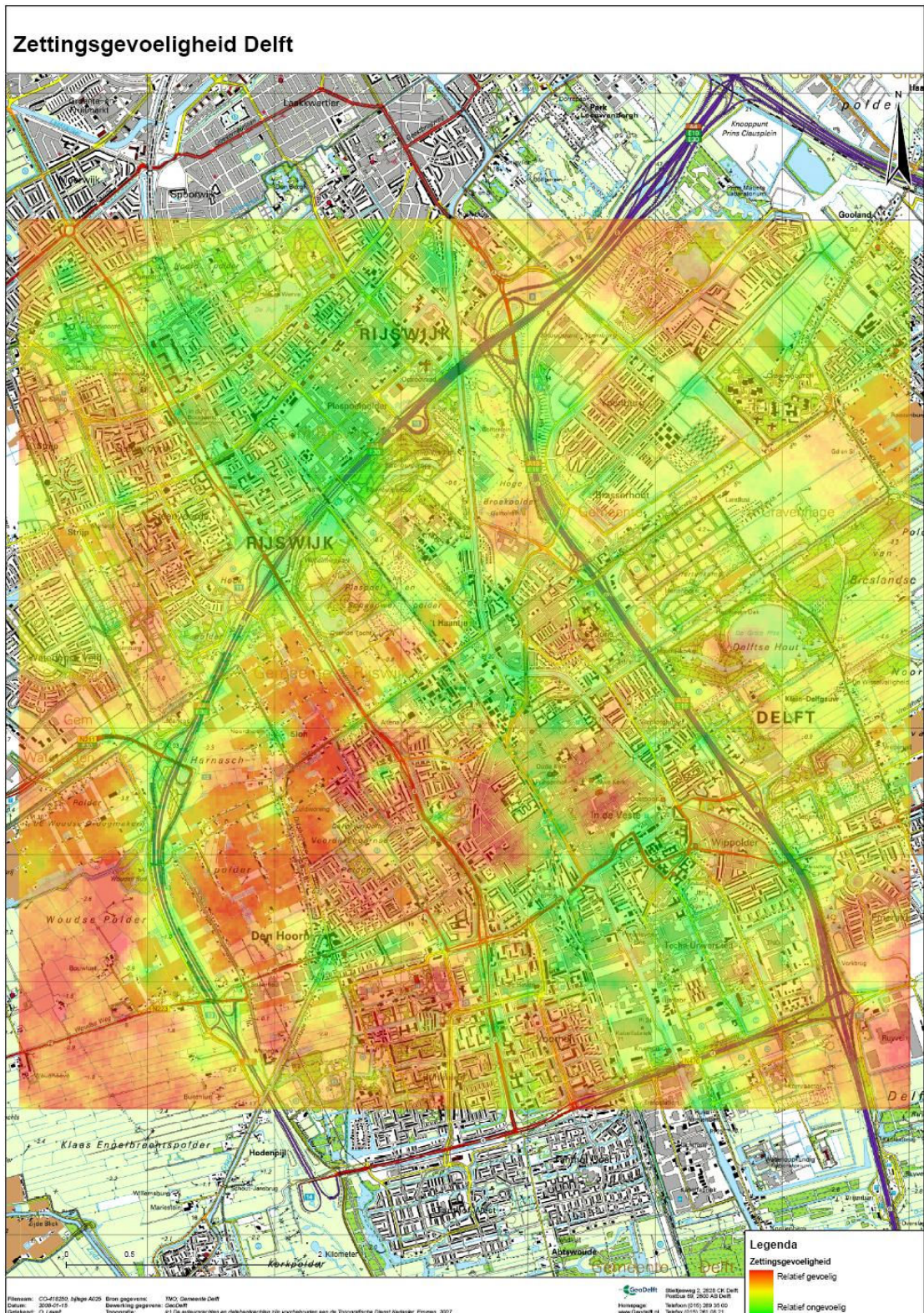
Figuur 6.1: Bodembeschrijving Markt in Delft volgens lithologie in DINO



Figuur 6.2: Oude sondeergrafieken van mechanische sonderingen in Delft

De verdeling van het patroon van maaiveldrijzing houdt verband met de zettingsgevoeligheid van de ondergrond. Deze wordt bepaald door het aandeel aan samendrukbare grond (klei en veen) in de bodemlagen. Met het ondergrondmodel kan een indruk worden verkregen van het patroon van zettingsgevoeligheid, zij het dat de nauwkeurigheid is gelimiteerd door de grootte van modelvakken van 25 m doorsnee. Uit de ervaring van geologen in dit gebied kan worden afgeleid dat variaties in grondlaagsamenstelling echter al over een afstand van 10 tot 20 m mogelijk zijn (bijvoorbeeld door geulopvullingen in wadafzettingen).

Een globaal beeld van de zettingsgevoeligheid kan worden gegeven door de dikte van klei en veen in de holocene lagen op te tellen en aan het aandeel veen een zwaardere weging mee te geven (voor de afbeelding is gekozen voor een samendrukbaarheid van veen die drie keer groter is dan van klei).



Figuur 6.3: Relatieve zettingsgevoeligheid Delft volgens gebruikt bodemmodel

De zettingsparameters die zijn ingevoerd in het regionale model, zijn afgeleid uit verzamelde archiefgegevens, onder andere van Deltares Geo-engineering. Deze archiefgegevens bevatten bijvoorbeeld ook recente resultaten van de onderzoeken voor

de spoorzone. Voor de schematisatie met het regionale model is een verdeling naar lagen volgens het per laag dominante grondtype uitgevoerd.

Tabel 6.1: Aangehouden parameterwaarden in het rijzingsmodel

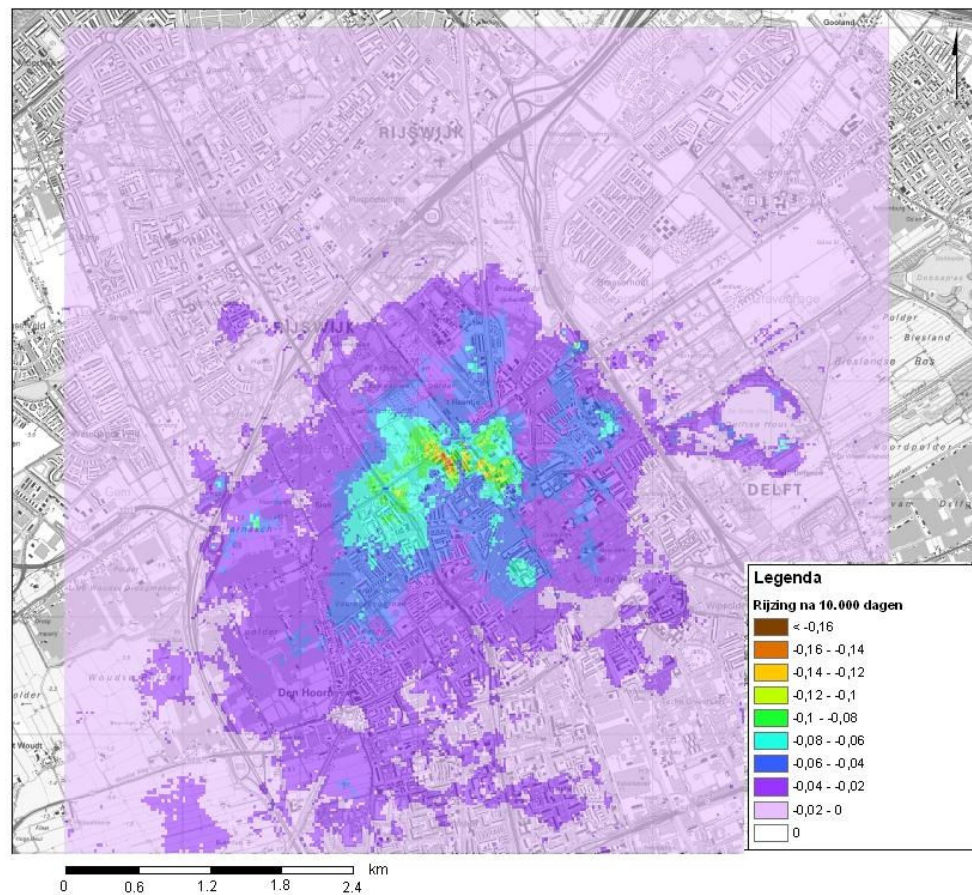
laagtype	$\gamma_{\text{unsat}}$	$\gamma_{\text{sat}}$	Cp	Cs	Cpp	Csp	Ap	As	k/Cv	Pcs	vox
"Zand 1"	18	18	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	7,00E-05	50	0
"Zand 2"	18	18	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	7,00E-05	50	0
"Zand 3"	19	19	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	5,00E-05	75	0
"Zand 4"	20	20	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	1,00E-05	100	0
"Zand, kleiig 1"	17	17	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	50	0
"Zand, kleiig 2"	17	17	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	50	0
"Zand, kleiig 3"	17,5	17,5	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	75	0
"Zand, kleiig 4"	20	20	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	100	0
"Klei 1"	15	15	40	400	10	60	40	4,00E+07	2,00E-07	50	0
"Klei 2"	15	15	40	400	10	60	40	4,00E+07	2,00E-07	50	0
"Klei 3"	15	15	40	400	10	60	40	4,00E+07	5,00E-09	50	0
"Klei 4"	16	16	75	600	20	100	75	6,00E+07	6,00E-07	75	0
"Klei 5"	18	18	80	1000	50	600	80	1,00E+08	5,00E-08	100	0
"Veen 1"	10	10	80	200	9	20	80	2,00E+07	1,00E-08	50	0,015
"Veen 2"	10	10	60	70	6	50	60	7,00E+06	1,00E-07	50	0,015
"Veen 3"	11	11	60	70	6	50	60	7,00E+06	1,00E-06	75	0,015
"Veen 4"	12	12	100	700	10	50	100	7,00E+07	5,00E-07	100	0,015
"Veen, kleiig 5"	11	11	60	70	6	50	60	7,00E+06	2,00E-07	50	0,015
"Veen, kleiig 6"	11	11	100	700	10	50	100	7,00E+07	5,00E-09	50	0,015
"Veen, kleiig 7"	12	12	100	700	10	50	100	7,00E+07	6,00E-07	75	0,015
"Veen, kleiig 8"	13	13	90	700	15	60	90	7,00E+07	5,00E-08	100	0,015

De rijzing bij volledige stopzetting van de winning is met deze parameterwaarden berekend. Om onderscheid te maken met doorgaande zetting in dit gebied is hier alleen het primaire deel volgens de optredende deconsolidatie beschouwd. De berekende ruimtelijke verdeling van de rijzing is in Figuur 6.4 weergegeven.

#### Voorbehoud

Op basis van het detailbeeld in Figuur 6.4 bestaat de neiging om locatiespecifiek naar effecten te gaan kijken. Maar let op dat deze uitkomsten niet kunnen worden gebruikt om op gridcelniveau (25x25m) exact af te leiden wat de effecten wel of niet zullen zijn. De interpretatie moet zijn dat er per zone een indicatie ligt van de effecten die te verwachten zijn.

De maximale maaiveldrijzing ten gevolge van de stopzetting van de winning is berekend op 0 tot 160 mm. Deze omvang is bepaald in een zettingsberekening als een primair deel als gevolg van deconsolidatie. Deze rijzing moet zoals vermeld worden gesuperponeerd op een doorgaande secundaire zetting in de orde van grootte van 0,5 tot 1 mm/jaar die karakteristiek is voor dit deel van Nederland. Voor een deel wordt deze veroorzaakt door oxidatie van veenlagen boven de grondwaterspiegel.



Figuur 6.4: Berekende omvang van de maaiveldrijzing [eindwaarde in meters]. Zie ook het voorbehoud

### 6.3 Zakking van funderingen door grondwaterstijging

In de Quicksan die in 2005 is uitgevoerd, is met name de zakking door afname van het draagvermogen van staal- en paalfundering aan de orde gesteld. Voor fundering op staal is toen globaal afgeleid in welke mate de freatische grondwaterstand stijgt door de toename van de stijghoogte. Daarmee is bepaald hoeveel de effectieve spanning of korrelspanning afneemt. Tevens neemt door de grondwaterstijging het effectieve grondgewicht naast de fundering af. Uit deze afgeleide gegevens is destijds berekend hoeveel de draagkracht van de grond onder de staalfundering afneemt en welke extra zakking ontstaat. Bij het ontbreken van geohydrologische berekeningsresultaten was deze afleiding nog zeer indicatief.

Tabel 6.2: Berekende zakkings van staalfunderingen

Zakkingsberekening	Funderingstype staal	
	Zakking van diepe staalfundering	Zakking van ondiepe staalfundering
Mate van stijghoogteverandering [m]	Zakking van diepe staalfundering [mm]	Zakking van ondiepe staalfundering [mm]
8	2 a 5	0 a 3
4	<	<
1	<	<



Uit de berekening volgde dat wat betreft het draagvermogen van staalfundering alleen in het gebied waar de grootste stijghoogteverandering optreedt ten gevolge van dit fenomeen een zakking van panden met een staalfundering wordt verwacht. Deze zakking is afhankelijk van de diepteligging van de fundering en van het bodemprofiel. Op locaties waar slechtere bovengrond voorkomt (kleiiger) binnen het invloedsgebied is de zakking groter.

Voor een fundering op palen is een soortgelijke berekening gemaakt. Hier is de berekening uitgevoerd door er volgens gebruikelijke rekenregels van uit te gaan dat de sondeerwaarde terugloopt ten gevolge van de afname van de korrelspanning, die weer het gevolg is van de toename van de stijghoogte. De zakking van de fundering kan worden afgeleid door gebruik te maken van het last-zakkingsgedrag van paalfunderingen.

Tabel 6.3.: Berekende zakking van paalfunderingen

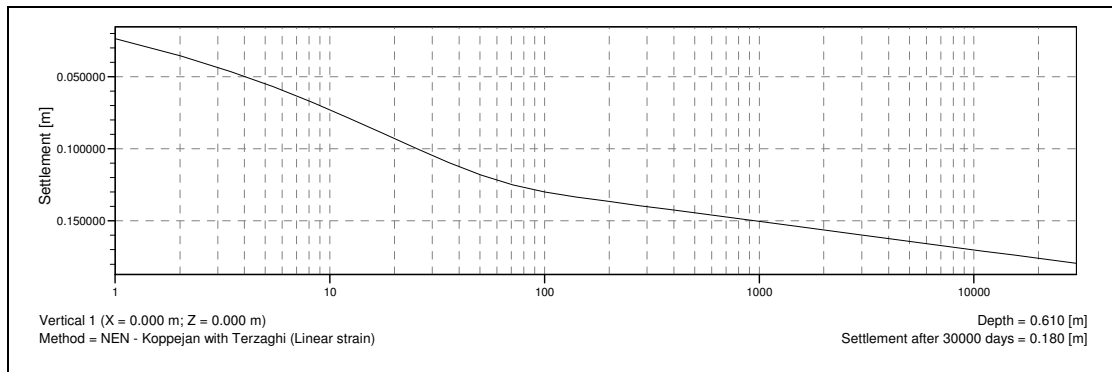
Zakkingsberekening	Funderingstype palen	
	Zakking voor houten palen [mm]	Zakking van betonpalen [mm]
Mate van stijghoogte-verandering [m]		
8	12	3
4	8	2
1	3	1

#### 6.4 Conclusie uit de rijzings- en zakkingsberekeningen

Nu het rijzingsmodel gereed is blijkt dat de omvang van de rijzing een groter effect heeft dan de zakking van funderingen als gevolg van de grondwaterstijging die in de Quickscan is beschouwd.

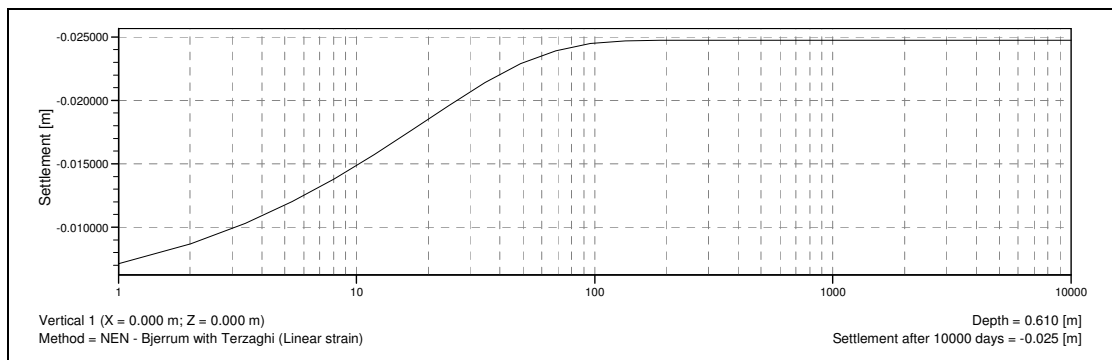
#### 6.5 Snelheid van rijzing

Bij de beoordeling of door de rijzing schade kan ontstaan is het van belang om na te gaan in welke mate er een verandering optreedt ten opzichte van de huidige zettingsnelheid. De vraag is hoe het huidige zettingsverloop is ten gevolge van de grondwaterwinning. De onttrekking van DSM is gestart in 1916 maar zal pas vele jaren later tot de huidige sterkte zijn toegenomen. Het tijdzettingsverloop is uitgezet over een duur van 30.000 dagen, globaal 80 jaar (zie Figuur 6.5). Berekend volgens de methode van Koppejan bedraagt de totaal opgetreden zetting in die hele periode tot nu toe circa 180 mm. De laatste jaren is de zetting volgens deze berekening niet meer dan 0,2 mm/jaar.



Figuur 6.5: Berekende historische zetting voor punt B1007 ten gevolge van de winning (logarithmische tijdschaal)

De verwachte rijzing (berekend volgens Bjerrum) voor dit punt is uitgezet in Figuur 6.6. Te zien is dat bij een directe verandering van de stijghoogten een rijzing wordt berekend die in een periode van ongeveer een jaar vrijwel de eindwaarde van 25 mm heeft bereikt.



Figuur 6.6: Berekende toekomstige rijzing voor punt B1007 na stoppen van de winning (logarithmische tijdschaal)

In werkelijkheid past de waterspanning in de deklaag zich na volledige stopzetting van de winning geleidelijk aan. Als een duur van de geohydrologische aanpassing van globaal een jaar wordt aangenomen zal de meeste rijzing in circa 2 jaar optreden.

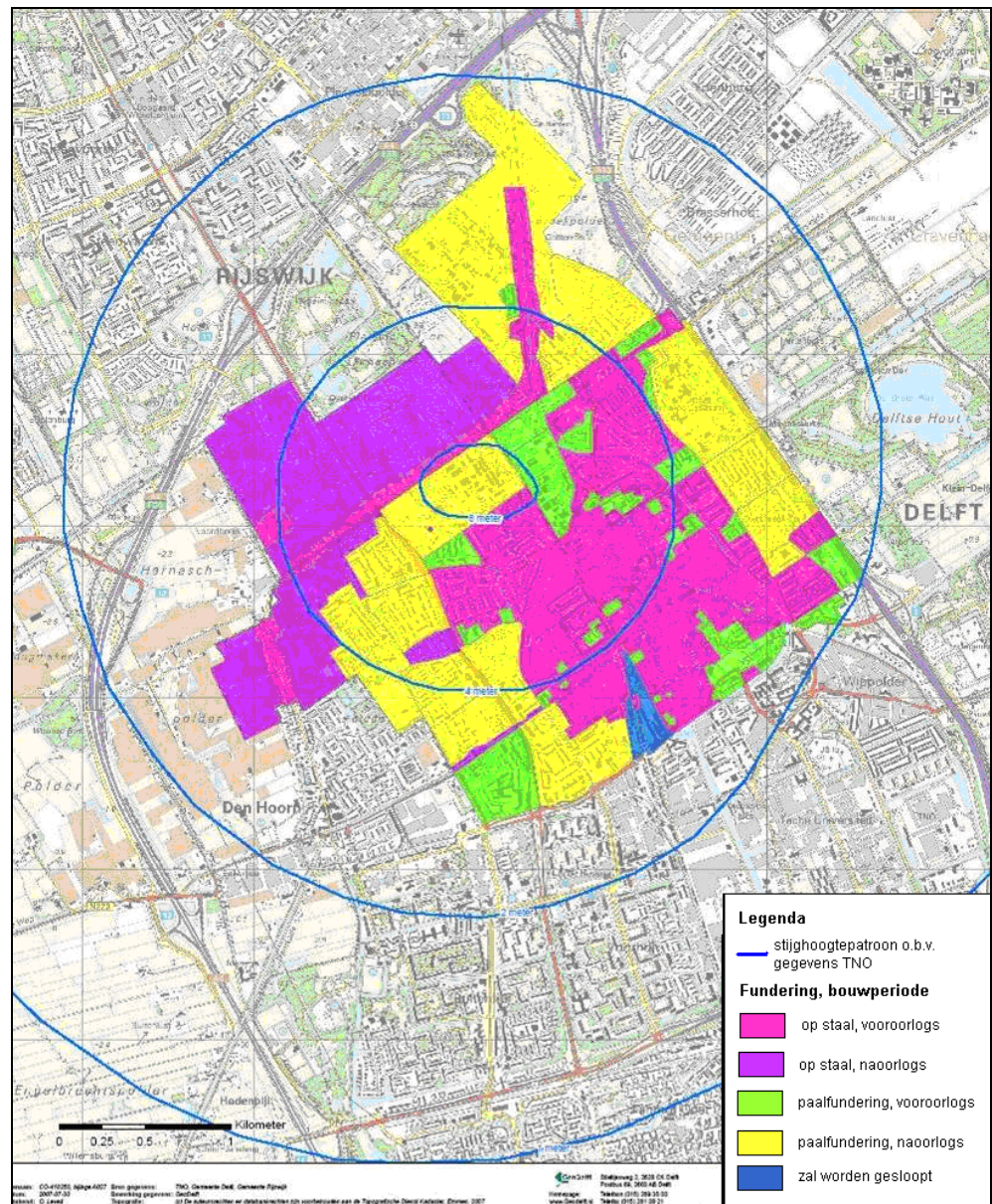
Uit deze globale berekeningen komt naar voren dat de omkering van de zetting naar rijzing in een gebied waar zandige tussenlagen voorkomen relatief snel verloopt (binnen een jaar)! Het is de vraag of de panden die voornamelijk op staal zijn gefundeerd en uit metselwerk zijn opgebouwd, de verandering met een dergelijke vervormingsnelheid kunnen ondergaan.

In de berekeningen is nog geen rekening gehouden met bovenbelasting die vanuit de funderingen aan de ondergrond wordt overgedragen. Waarschijnlijk is sprake van belastingsverschillen over de lengte en breedte van de panden. Dit aspect zal nader moeten worden beschouwd om een oordeel in de vorm van een schadepredictie te kunnen geven.

## 7 Uitwerking schadeprognose

### 7.1 Inventarisatie funderingen

In het vervolg van het onderzoek is een inventarisatie van funderingstypen uitgevoerd. Dit is gedaan door inspecteurs van de gemeentelijke Bouwtoezicht en Monumentenzorg van Delft te bevragen op hun ervaringen in het gebied. Dit heeft geleid tot een globale kaart met gebieden waarin staal en paalfunderingen voorkomen en de globale ouderdom van de panden.



Figuur 7.1: Belangrijkste type fundering en bouwperiode

Uit de inventarisatie van ouderdom van wijken is afgeleid van welk type fundering mogelijk in een gebied sprake zou kunnen zijn. Op basis van een GIS-berekening met een pandenkaart van de Gemeente Delft is geschat hoeveel panden per wijk mogelijk worden beïnvloed. Er wordt verwacht dat in wijken waar geen overschrijding van 0,04 m rijzing optreedt de zettingsschade nihil zal zijn. In de tabellen zijn omliggende wijken echter wel meegenomen.

Tabel 7.1 en Tabel 7.2 geven per wijk het overzicht van het aantal panden met respectievelijk paalfunderingen en funderingen op staal. Omdat het om een automatische bepaling gaat staan er in de tabel geen afgeronde waarden maar de aantallen moeten wel gehanteerd worden als indicatief.

Tabel 7.1: Inventarisatie aantal panden met overwegend **paalfundering**, in geel meest beïnvloede wijken, Rijswijk niet meegenomen

Wijk, of buurt	Aantal panden	Aantal monumenten	Rijksmonument	Gemeentemonument
DSM Bedrijventerrein Altena	155			
DSM Bedrijventerrein Wateringseweg	124	1	1	
Agnetaarkbuurt	29			
Bedrijventerrein Haagweg	42			
Biesland	125			
Bomenwijk	76			
Centrum	40	12	6	6
Centrum-Noord	79	8	1	7
Centrum-Oost	52	5	3	2
Centrum-West	27	7	6	1
Centrum-Zuidoost	14	4	4	
Centrum-Zuidwest	20	3	3	
Ecodus	216			
Heilige Land	120			
Hoornse Hof	542			
In de Veste	63			
Indische buurt-Noord	12			
Indische buurt-Zuid	53			
Koepoort	99			
Krakeelpolder	168			
Kuyperwijk-Noord	90			
Kuyperwijk-Zuid	111			
Marlot	120			
Ministersbuurt-West	13			
Olofsbuurt	22			
Sint Joris	94	1	1	
Westeindebuurt	39			
Westerkwartier	172			
Westlandhof	522	5	5	
Zuidpoort	195	18	18	
<b>Totaal aantal per klasse</b>	<b>3155</b>	<b>63</b>	<b>47</b>	<b>16</b>
<b>Beïnvloed door winning</b>	<b>763</b>	<b>33</b>	<b>17</b>	<b>16</b>
<i>percentage</i>	<i>24%</i>	<i>52%</i>	<i>36%</i>	<i>100%</i>

Tabel 7.2: Inventarisatie aantal panden met overwegend **staalfundering**, in geel meest beïnvloede wijken, Rijswijk niet meegenomen

Wijk of buurt	Aantal panden	Aantal monumenten	Rijks-monument	Gemeente-monument
DSM Bedrijventerrein Altena	6	3	3	
Aagnetaparkbuurt	645	379	379	
Bedrijventerrein Haagweg	57			
Biesland	10			
Centrum	1271	437	269	168
Centrum-Noord	322	32	12	20
Centrum-Oost	1396	248	64	184
Centrum-West	1273	364	208	156
Centrum-Zuidoost	480	70	14	56
Centrum-Zuidwest	482	110	52	58
Heilige Land	645			
Hoornse Hof	168			
In de Veste	732	92	12	80
Indische buurt-Noord	63			
Indische buurt-Zuid	585			
Koepoort	753			
Kuyperwijk-Noord	58			
Kuyperwijk-Zuid	43			
Marlot	17	1	1	
Ministersbuurt-Oost	1008	1	1	
Ministersbuurt-West	177			
Olofsbuurt	1240	2	2	
Stationsbuurt	98	1	1	
Westeindebuurt	31			
Westerkwartier	1224	1		1
Zuidpoort	4	2	2	
<b>Totaal aantal per klasse</b>	<b>12782</b>	<b>1740</b>	<b>1017</b>	<b>723</b>
<b>Beïnvloed door winning</b>	<b>8891</b>	<b>1463</b>	<b>935</b>	<b>528</b>
<i>percentage</i>	<i>70%</i>	<i>84%</i>	<i>92%</i>	<i>73%</i>

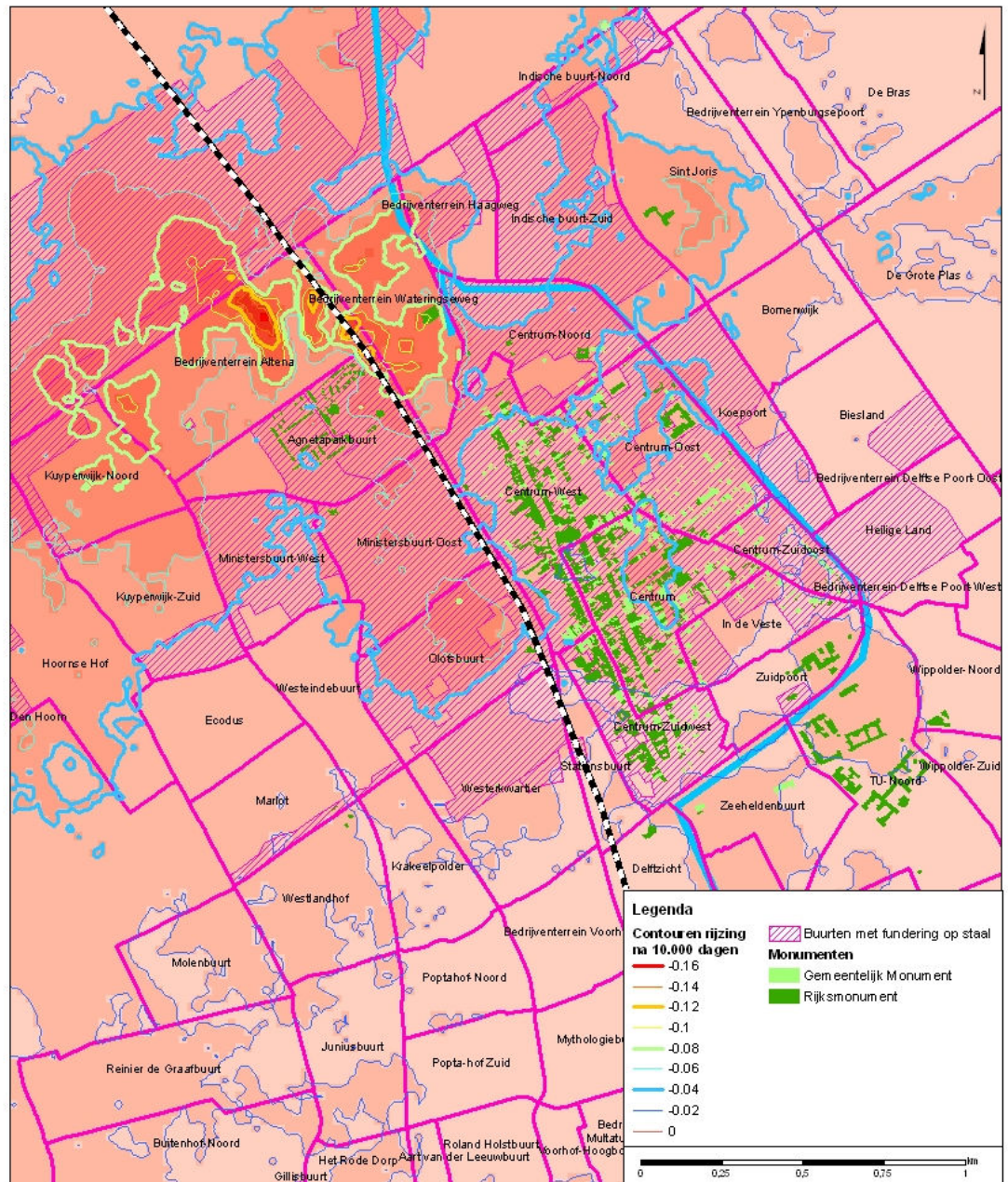
Uit de inventarisatie volgt dat het aandeel panden met een paalfundering in de beschouwde wijken van de Gemeente Delft veel kleiner is dan in de Quicksan is aangenomen, namelijk slechts 20% van het totale aantal panden. Bovendien, als het om de kwetsbare houten paalfunderingen gaat is deze verhouding nog kleiner, waarschijnlijk in de orde van 5%. In de Quicksan is reeds aangegeven dat de mate van schade die kan ontstaan bij panden met een paalfundering voornamelijk in de categorie zeer licht valt. Het aandeel van deze panden in de totale schade is dus klein.

De rijzings- en zakkingschade kan door het verzamelen van veel veldgegevens van de panden in het invloedsgebied in principe nog genuanceerder worden geprognostiseerd met betrekking tot de huidige bouwkundige staat van die panden. Vanwege de omvang van de daarmee gemoeide inspanning is dit aspect nu niet verder uitgewerkt. De schatting die in het voorliggende onderzoek kan worden gedaan met betrekking tot schade aan panden hangt daarom in het bijzonder samen met het ondergrondmodel en de betrouwbaarheid daarvan.

## 7.2 Uitwerking schadeprognose panden met staalfundering

Er wordt verwacht dat de optredende bodemrijzing tot schade kan leiden aan panden met een staalfundering omdat de rijzing vrij snel optreedt, voor het grootste deel in ongeveer 1 à 2 jaar tijd na stopzetting van de winning.

De mate van schade is afhankelijk van de omvang van de rijzing en het type panden binnen de rijzingscontouren. Dit is uitgewerkt en aangegeven in de volgende figuur.



Figuur 7.2: Rijzing [in m], buurten en voorkomen panden met staalfundering en monumenten

Per buurt is vervolgens bepaald hoeveel panden binnen een zekere klasse van grootte van de rijzing vallen. Dit is in de volgende tabel aangegeven.

Tabel 7.3: Inventarisatie aantal panden met overwegend staalfundering, verdeeld naar mate van zetting, in geel meest beïnvloede wijken, DSM-terrein en Rijswijk niet meegenomen

Panden met staalfundering in buurt:	Aantal panden in rijzingsklassen [m]				
	0 - 0,02	0,02 - 0,04	0,04 - 0,06	0,06 - 0,08	0,08 - 0,10
Agnetaarkbuurt		10	590	25	
Bedrijventerrein Haagweg		39	2		
Biesland	3				
Centrum	109	888	242		
Centrum-Noord		120	197		
Centrum-Oost	5	1170	200		
Centrum-West	4	1048	180		
Centrum-Zuidoost	167	310			
Centrum-Zuidwest	407	57			
Heilige Land	630				
Hoornse Hof		47	69	18	
In de Veste	398	311			
Indische buurt-Noord		31	25		
Indische buurt-Zuid		387	182		
Koepoort	300	313	127		
Kuyperwijk-Noord				47	10
Kuyperwijk-Zuid		40	1		
Marlot	1	16			
Ministersbuurt-Oost		23	883	99	
Ministersbuurt-West		120	43		
Olofsbuurt	12	442	511	263	
Stationsbuurt	45	44			
Westeindebuurt		31			
Westerkwartier	170	1051			
Zuidpoort	2				
<b>Totaal aantal per klasse</b>	<b>2253</b>	<b>6498</b>	<b>3252</b>	<b>452</b>	<b>10</b>
<b>Beïnvloed door winning</b>	<b>430</b>	<b>4631</b>	<b>3183</b>	<b>434</b>	<b>10</b>
<i>Percentage</i>	20 %	70 %	97 %	97 %	100 %

Op basis van de berekening van de absolute grootte van de rijzing per pand kan een schatting worden gemaakt van de verschilvorming per pand in het invloedsgebied. Er is uitgegaan van een mogelijke verschilvorming die een derde tot de helft is van de met het zettingsmodel berekende absolute rijzing. Om de hoekverdraaiing te berekenen kan worden uitgegaan van een karakteristieke maat (gemiddelde diepte vanaf de voorgevel of gevelhoogte van de meeste panden) van 10 m. Deze maat kan nog worden afgezet tegen de eerdere opmerking over karakteristieke afstanden van 10 tot 20 m met betrekking tot in het gebied voorkomende geologische heterogeniteit.

De hoekverdraaiing wordt gerelateerd aan een schadebeeld zoals voorgesteld in de literatuur. Voor de indeling van schadelasten kan de indeling volgens de internationaal geaccepteerde tabel van Boscardin worden aangehouden. Voor herstelwerk zijn voor een gemiddelde woning herstelkosten geschat per klasse.



Tabel 7.4: Indeling in schadeklassen voor schade aan belendingen [Boscardin] De schadeklassen 1 en 2 worden aangemerkt als architectonische schade, schadeklassen 3 t/m 5 als constructieve schade. Herstellkosten volgens indicatieve schatting

Schadeklassen / beschrijving	Relatieve hoekverdraaiing $\beta$ (x 10 <sup>-3</sup> )	Raming herstellkosten (€)
<b>Klasse 0 - verwaarloosbare schade</b>		Nihil
<b>Klasse 1 - zeer lichte schade</b> Scheuren maximaal 0,1 mm	0 - 1,67 (0 tot 1:600)	1.000
<b>Klasse 2 - lichte schade</b> Scheuren maximaal 5 mm Lichte vervorming van kozijnen	1,67 – 3,33 (1:600 tot 1:300)	5.000
<b>Klasse 3 - matige schade</b> Scheuren maximaal 15 mm Matige vervorming van kozijnen Lekkage Gescheurde dienstleidingen	3,33 – 6,67 (1:300 tot 1:150)	15.000
<b>Klasse 4 - ernstige schade</b> Scheuren maximaal 25 mm Sterke vervorming van kozijnen Merkbaar hellende vloeren (> 1:100) Scheefstand van muren(>1:100) Bolling van muren Enkele balken verliezen opleglengte Gebroken dienstleidingen	6,67 – 10 (1:150 – 1:100)	75.000
<b>Klasse 5 - zeer ernstige schade</b> Scheuren minimaal 25 mm Balken verliezen opleglengte Muren moeten worden gestut Gebroken ramen Gevaar voor instabiliteit / instorting	> 10 ( 1:100 en meer)	250.000

Gegeven de range van uitkomsten voor de rijzing in het gebied kan in het invloedsgebied de omvang van de schade worden bepaald zoals vermeld in de volgende tabel.

Tabel 7.5: Mogelijk voorkomende schade aan panden na sluiting van de winning, uitgaande van verschilfactor 0,5 in zakkings- en karakteristieke lengte van 10 m

Absolute rijzing [m]	Zakkingsverschil [m] factor = 0,5	Karakteristieke Lengte [m]	Hoekverdraaiing 1:x	Schade (conform Boscardin)
0,02	0,01	10	1000	nihil
0,04	0,02	10	500	zeer licht
0,06	0,03	10	333	licht
0,08	0,04	10	250	matig
0,10	0,05	10	200	matig
0,12	0,06	10	167	matig
0,14	0,07	10	143	ernstig
0,16	0,08	10	125	ernstig

Vervolgens zijn afhankelijk van de ernst van schade herstelkosten geschat. Dit is dezelfde methodiek die bij de Quicksan is toegepast in 2005.

Daarbij kan echter nog worden gevarieerd met de omvang van het verwachte zakkingsverschil (0,33 à 0,5) en met de karakteristieke lengte (10 à 20 m).

Als deze variabelen in de berekeningen worden ingevoerd ontstaat een beeld van de mogelijke spreiding van de schade bij de huidige stand van de informatie omtrent bodembeweging en bouwwijze en kwetsbaarheid van de panden.

Tabel 7.6: Mogelijke spreiding qua schade aan panden in Delft met staalfundering na sluiting winning

Schade-inventarisatie StaaLfunderingen [EUR]		Factor zakkingsverschil [-]	
		0,33	0,50
Karakteristieke lengte	10 m	5.662.000	29.688.000
	20 m	462.000	5.562.000

Zoals men kan zien is de spreiding in de uitkomsten van de berekening zeer groot en is vooral de uitloop naar het maximum aanzienlijk. In het resultaat is dus een zeer grote onzekerheid aanwezig. Die onzekerheid zit vooral in de zich werkelijk realiserende mate van rijzing, de heterogeniteit van de bodem, de kwetsbaarheid van de panden en de rekenregels. Er kan wel worden gesteld dat schade met name zal optreden in lange aaneengesloten bouwblokken of bij hoekpanden waar de funderingsdruk meer varieert. Ook waar aanbouwen aanwezig zijn of waar in het verleden schade is voorgekomen, is de kans op schade groter. In de schadeprognose kan ook nog een kansdeel worden meegenomen. Een dergelijke benadering vraagt echter om een gedetailleerder onderzoek.

Het is aan te bevelen om naar het belang van deze onderwerpen nadere studie te verrichten. Vooralsnog zal een verwachtingswaarde van de schade aan panden op staalfunderingen worden aangehouden van € 5.562.000.

Voor panden in wijken van Rijswijk (Sion, 't Haantje, Delftweg etc) waren op het moment van deze rapportage geen gegevens beschikbaar. Er is een zeer globale schatting gemaakt van het aantal panden en de mogelijke omvang van schade. Daarnaast is een reservering gedaan voor herstel van schade aan belangrijke Rijksmonumenten in Delft. Binnen het beschouwde gebied zijn dit 57 locaties. Een aantal daarvan ligt in de Agnethaparkbuurt en is dus kwetsbaar vanwege de afstand tot

de winning. Dit zijn echter kleine panden. Daarnaast zijn er enkele grote monumenten van nationale importantie. Deze liggen echter niet in gebieden waar veel rijzing wordt verwacht. Toch is voor deze panden vanwege de onzekerheid een herstelbudget opgenomen.

Tabel 7.7: Prognose van schade aan belendingen door volledig stopzetten van de winning

Wijk of buurt	Ernst schade	Herstelkosten [euro/pand]	Total [euro]
Paalfunderingen Delft	Zeer licht	1000	763.000
Staalvunderingen Delft	divers	divers	5.562.000
Panden Rijswijk	divers	divers	1.000.000
Nieuwe Kerk	onzeker		250.000
Oude Kerk	onzeker		250.000
Prinsenhof	onzeker		250.000
Hoogheemraadschapshuis	onzeker		250.000
Stadhuis	onzeker		250.000
overige monumenten	PM	PM	550.000
Bedr DSM/Calve	ernstig	PM	niet begroot
Kelders/garages	nader onderzoek		40.000
Kelders/garages	constructieve maatregelen	PM	niet begroot
<b>Totaal</b>			<b>9.165.000</b>

- De in de Tabel 7.7 vermelde kosten zijn een schatting van de kosten voor herstel van schade aan panden indien de winning sluit. Het vermelde herstelbedrag moet worden gezien als een reservering voor mogelijke kosten bij schademelding door particulieren.
- De kosten van herstel van monumenten zijn hoog geschat. Daarbij is rekening gehouden met de aanbeveling om ter plaatse van dergelijke belangrijke monumenten een iets uitgebreidere monitoring ter bewaking van vervorming in te richten.
- Kosten aan bedrijfspanden op het DSM terrein zijn niet meegenomen.
- Ook de kosten in verband met mogelijk opdrijven van **kelderconstructies** zijn nog niet begroot. Er wordt aanbevolen dat aspect apart te onderzoeken. Kosten voor een dergelijk onderzoek (bestaande uit het lichten en beoordelen van constructiegegevens uit het archief van Bouwtoezicht van de Gemeente) zijn voorlopig in de orde van grootte van 40.000 euro geraamd. Afhankelijk van de uitkomsten dient te worden vastgesteld of constructieve maatregelen noodzakelijk zijn.

Onderstaande tabel geeft het overzicht van de geraamde kosten waarbij de onzekerheid uit Tabel 7.6 is gecombineerd met de gegevens uit Tabel 7.7.

	1400 m <sup>3</sup> /uur	1000 m <sup>3</sup> /uur	800 m <sup>3</sup> /uur	Stopzetting
<i>Schade aan bebouwing min.</i>	0	1.100.000 + PM	1.700.000 + PM	4.000.000 + PM
<i>Schade aan bebouwing gem.</i>	0	2.600.000 + PM	3.900.000 + PM	9.200.000 + PM
<i>Schade aan bebouwing max.</i>	0	9.500.000 + PM	14.200.000 + PM	33.200.000 + PM

### 7.3 Aanbevelingen voor afbouw van de onttrekking en monitoring

Op grond van de hierboven uitgewerkte analyse van de effecten van stopzetting van de winning moet worden aanbevolen om de mogelijke geotechnische effecten mee te nemen in de besluitvorming rond de stopzetting.

Op het fabrieksterrein van DSM kan de grondmechanische rijzing door stijging van de stijghoogte aanzienlijk zijn. De effecten in de bebouwde omgeving van DSM zijn waarschijnlijk gering maar niet te verwaarlozen. Het is aan te bevelen om bij stopzetting van de winning een fonds voor schadeherstel en een schadecommissie in te stellen.

Vanwege de huidige onzekerheden in het model en ten aanzien van de huidige staat van de panden in het gebied is het de vraag of de effecten zich volledig zullen ontwikkelen zoals volgens het geomechanische model berekend is.

Als het effect zich voordoet zal het echter in relatief korte tijd (een jaar) kunnen plaatsvinden. Mogelijk hebben de aanwezige constructies onvoldoende incasseringsvermogen om deze veranderingen schadevrij te ondergaan.

Op basis van de grondmechanische analyse van de rijzing bevelen wij in de eerste plaats aan om het stopzetten van de winning gefaseerd plaats te laten vinden. Na instelling van het lage winterdebiet van de onttrekking kan de winning onder voortdurende monitoring van effecten worden afgebouwd. De grootte van de reductiestap zal proefondervindelijk worden bepaald waarbij als indicatie een reductie van 50 m<sup>3</sup>/uur wordt voorgesteld.

Het huidig monitoringmeetnet is onvoldoende om optredende effecten tijdig vast te stellen. Wij bevelen aan om ter bewaking enkele nieuwe primaire monitoringpunten van grondwaterstanden en hoogte in te richten. De hoogtemeting dient bij voorkeur te worden ingericht met extensometers en een vast punt in het pleistocene zand. In pleistoceen zand, de tussenzandlaag en in freatisch grondwater dienen ter plekke peilbuizen te worden aangebracht. In verband met de plaatsing is het verstandig om vooruitlopend ter plekke sonderingen uit te voeren waarmee laaginterpretatie wordt verricht. Het is aan te bevelen meerdere van dergelijke monitoringpunten in een raai te plaatsen:

- op het terrein van DSM (eerste alarmering bij veranderingen);
- op een punt 'halverwege Sion en 't Haantje;
- in het Agnethapark;
- op de Markt in Delft.

Daarnaast bevelen wij aan om enkele bouwblokken te voorzien van hoogtemerken meerdere plekken (bijvoorbeeld over een lengte van 100 m) waarmee verschilzakkingen in een bouwblok kunnen worden bepaald. Enkele locaties waar dergelijke meetreeksen kunnen worden aangebracht zijn bijvoorbeeld Agnethapark, Oude Delft en de Olofsbuurt.

Selectie van andere objecten dient in overleg met de betreffende gemeentelijke dienst Monumentenzorg te worden gedaan. Daarnaast is het noodzakelijk om enkele kenmerkende monumenten van hoogtemeetpunten te voorzien: de Oude kerk, het Prinsenhof, de Nieuwe kerk en het oude stadhuis. Detailontwerp is voor deze inrichting van monitoring nodig.

## 8 Controleberekeningen rijzingsmodel

### 8.1 Aanpak van de controle

Voor de vaststelling van de te verwachten rijzingen door de eventuele stopzetting van de winning is een nieuw programma voor zettingsberekeningen op regionale schaal ingezet. De daarin gehanteerde rekenmethode is gebaseerd op de aanpak volgens Koppejan. Dit programma is door Deltares Utrecht (voorheen TNO Bouw en Ondergrond) vervaardigd en maakt via een koppeling met het grondwaterstromingsprogramma ModFlow gebruik van de daarin berekende grondwaterstijghoogten. Vanwege het feit dat het programma recent ontwikkeld is, was het noodzakelijk om de daarmee berekende resultaten te controleren. Daartoe is een kwaliteitsborging in de vorm van een second opinion uitgevoerd. De second opinion is verricht door Deltares Geo-engineering in Delft (voorheen GeoDelft). Voor de second opinion is de volgende opzet gevolgd:

- Controle van de in het rekenmodel ingevoerde bodemprofielen op enkele geselecteerde bekende boorpunten;
- Controle van ingevoerde initiële grondwaterstanden (met ModFlow berekend) voor de huidige situatie met onttrekking aan de hand van bekende monitoringsresultaten;
- Controle van ingevoerde zettings/rijzingsparameters voor onderscheiden bodemlagen;
- Herberekening met beschikbare gevalideerde grondmechanische programmatuur volgens rekenmethode Koppejan en gelijke invoer als in het nieuwe model;
- Vergelijkingsberekening met beschikbare gevalideerde grondmechanische programmatuur volgens rekenmethode Koppejan op basis van de bodemprofielen voor de geselecteerde boorpunten;
- Vergelijkingsberekening met beschikbare gevalideerde grondmechanische programmatuur volgens rekenmethode NEN-Bjerrum op basis van de bodemprofielen voor de geselecteerde boorpunten;
- Analyse van de resultaten, conclusie over de betrouwbaarheid van de prognoses.

Zoals aangegeven zijn meerdere controleberekening gemaakt.

Voor de controle hebben wij ons gebaseerd op de gegevens die zijn verzameld ten behoeve van een ander project in Delft, namelijk de tamelijk gedetailleerde grondonderzoeken voor de toekomstige spoortunnel. Er zijn aanvullende boringen, sonderingen en peilbuizen geplaatst en er zijn op monsters uit de boringen samendrukkingsproeven gedaan door Fugro. De volgende locaties (6 boringen B, 2 sonderingen DKM) uit dit bestand zijn genomen om de berekeningen te controleren.

Tabel 8.1: Overzicht locaties voor controleberekening

<b>meetpunten</b>	<b>coördinaatpunten</b>	
<b>boorpunt</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
B1002	83107	448933
B102	83390	448575
B1007	83862	447863
DKM1016	84159	447354
DKM1019	84211	447182
B1024	84320	446898
B1029	84451	446317
B1031	84658	445684

<b>meetpunten</b>	<b>coördinaatpunten</b>		<b>ondiep filter in zand van holoceen</b>	<b>diep filter in zand van pleistoceen</b>
<b>peilbuis</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>[m NAP]</b>	<b>[m NAP]</b>
S105	83811,5	447837,9	-11,75	-19,85
S112	84082,2	447491,7	-12,45	-19,50
S121	84178,9	447218,5	-10,60	-22,70
S130	84276,3	446920,3	-13,25	-17,75

## 8.2 Controle van de in het rekenmodel ingevoerde bodemprofielen

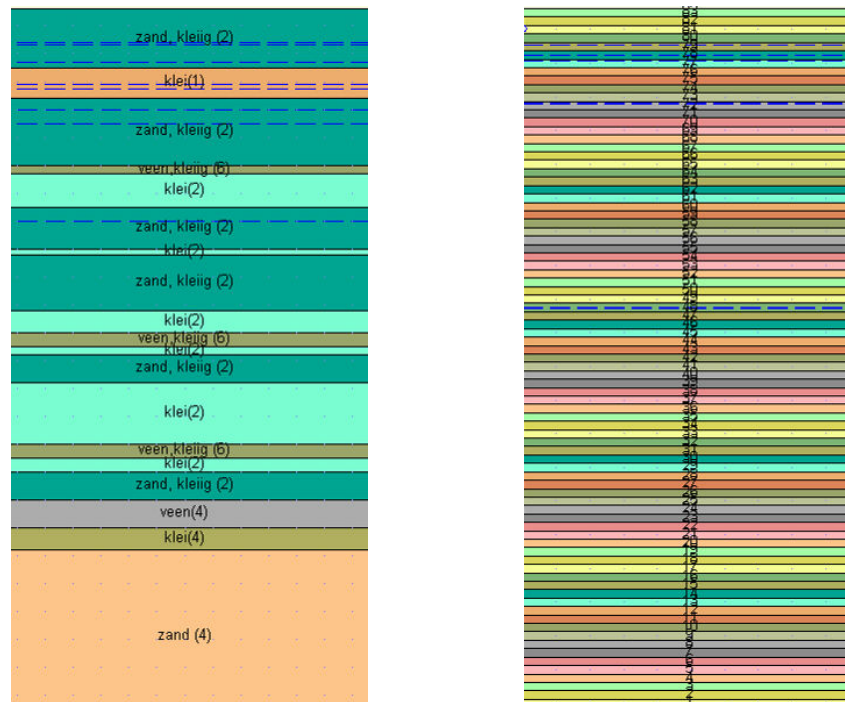
In het Modflow model en in het regionale zettingsmodel is een modelopbouw toegepast die bestaat uit een veelheid van geschematiseerde lagen met een dikte van 0,25 m over de bovenste 22,50 m van de bodem.

Om de invoer te vereenvoudigen is per 0,25 m de dominante grondsoort als laagtype in het model aangenomen. Er zijn voor de hele regio 21 laagtypen met specifieke eigenschappen geselecteerd. Dat resulteerde in een automatische invoermogelijkheid van de laagopbouw en de eigenschappen konden worden ingevoerd. De invoer in het model is door middel van beschikbare boringen en sonderingen in het gebied via de door TNO aangemaakte REGIS-module verricht waarbij een ruimtelijke interpolatie plaatsvindt.

In de standaardaanpak bij zettingsberekeningen volgens het gereedschap MSettle worden op afzonderlijke verticalen de boorbeschrijvingen of sonderingen ingevoerd en wordt de laagdikte gekozen op basis van profieldelen met gelijk beschreven grondsoort en bestanddelen.

De boorprofielen op de meetpunten zoals deze zijn verwerkt in het geologisch profiel van de Spoorzone Delft zijn vergeleken met de laagschema's die in het zettingsmodel zijn gebruikt.

De verschillen in de laagdikteschematisatie blijkt uit onderstaande figuur.



Figuur 8.1: Wijze van schematiseren van laagdikten in MSettle en met het nieuwe programma

*De volgende zaken vielen op.*

Waarschijnlijk is er sprake van een interpretatieverschil waardoor de boorprofielen voor wat de holocene zanden betreft een sterker kleilig karakter hebben dan in de schematisatie in het regionale model is ingebouwd.

Locatie B102 kent in het model meer veen in de toplagen dan in de originele boorbeschrijving.

Onderin het schema ter plaatse van locatie B1019 (Westvest nabij Binnenwatersloot) wordt een kleilaag aangenomen. Ter plekke komt een op het pleistocene zand gefundeerde geulafzetting voor. Mogelijk is hier een zeer veel kleinere hydraulische weerstand dan in het regionale model is ingebouwd

### 8.3 Controle van in het model ingevoerde initiële grondwaterstanden

Voor deze vergelijking is van een serie metingen rondom de spoorzone gebruik gemaakt. Deze zijn niet voor de calibratie van het model gebruikt, zeker omdat er te weinig overlap is met de gewenste tijdreeks voor het model (periode 1994-2004). De meetwaarden in de tabel zijn (op het oog genomen) gemiddelden van de meetreeksen die de periode na oktober 2002 beschrijven. Beide perioden verschillen waardoor een-op-een vergelijking niet zondermeer mogelijk is.

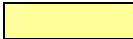
Tabel 8.2: Grondwaterstanden en stijghoogten gemeten in aanvullende meetpunten

Monitoring Spoorzone	pleistoceen		Tussenzandlaag		Waterstad freatisch	
	winning aan		winning aan		winning aan	
t.p.v.	peilbuis	[m NAP]	peilbuis	[m NAP]	Peilbuis	[m NAP]
B1002					?	-0,40
B102					13-103	-1,30
B1007	S105	-7 a -9,5	S105	-3,4	13-107	-1,00
DKM1016	S112	-6 a -8	S112	-3,5	13-115	-0,55
DKM1019	S121	-6 a -7,5	S121	-2,7	13-120	-0,60
B1024	S130	-5,5 a -7	S130	-2,8	13-121	-1,00
B1029					27-102	-0,90
B1031					27-102	-0,90

De grondwaterstanden zoals zijn berekend in het Modflow-model staan in Tabel 8.3. Het gaat om gemiddelde waterstanden over de periode 1994-2004.

Tabel 8.3: Volgens het grondwatermodel berekende stijghoogten

Verticale positie:	Diep		Tussenzandlaag		Freatisch	
	uit	aan	uit	aan	Uit	aan
t.p.v.	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]	[m NAP]
B1002	-2,03	-7,15	-1,32	-1,83	-1,22	-1,23
B102	-2,10	-9,45	-0,94	-1,68	-0,44	-0,46
B1007	-2,22	-8,27	-0,75	-1,37	-0,47	-0,62
DKM1016	-2,32	-6,14	-0,85	-1,71	-0,39	-0,44
DKM1019	-2,34	-5,81	-0,94	-1,73	-0,43	-0,45
B1024	-2,40	-5,29	-1,10	-1,78	-0,56	-0,59
B1029	-2,50	-4,60	-1,35	-1,86	-0,99	-1,11
B1031	-2,58	-4,06	-1,72	-2,24	-1,38	-1,75

 = modelwaarde wijkt af van recente metingen

De verschillen tussen de monitoring van de werkelijke situatie en de met Modflow berekende waarden voor het geval met de onttrekking van aan zijn als volgt. Het stijghoogteverloop in het pleistoceen is in het model iets te steil. De stijghoogte in de voorkomende tussenzandlagen (geulafzettingen Gantelcomplex) wordt in het model duidelijk te hoog berekend, is dus te weinig onder invloed van de onttrekking. De freatische standen zijn daarentegen in lichte mate te hoog.

De afwijkingen tussen de metingen en het model zijn mogelijk te verklaren door een te groot aangenomen hydraulische weerstand onderin de holocene lagen en een te kleine weerstandswaarde bovenin het pakket en/of een te groot effect toegekend aan het open water. De totaal aangenomen weerstandswaarde van het holoceen is waarschijnlijk wel redelijk correct.

In de waterspanningsverdeling over de verticaal worden in de berekeningsresultaten van het ModFlow-model zeer abrupte overgangen in het stijghoogteverloop over laagscheidingen aangetroffen (bij B102 bijvoorbeeld 6 m stijghoogteverschil over een laagdikte van 0,25 m op een diepte van 19 m). Dit zijn geen reële uitkomsten in grondmechanisch opzicht waarbij een gelijkmatig waterspanningsverloop mag worden verwacht over pakketten met slecht doorlatende lagen.



## 8.4 Controle van ingevoerde zettings/rijzingsparameters

De zettingsparameters die zijn ingevoerd in het regionale model, zijn afgeleid uit verzamelde archiefgegevens, onder andere van Deltares Geo-engineering. Deze archiefgegevens bevatten reeds de resultaten van de onderzoeken voor de spoorzone. Voor de schematisatie met het regionale model is nog wel een verdeling naar lagen volgens het per laag dominante grondtype uitgevoerd. Het aantal grondsoorten is daarbij echter iets vergroot ten opzichte van het aantal grondtypen waarop de samendrukkingsproeven zijn uitgevoerd. In de proeven van de spoorzone komen echter ook nog wel wat vreemde resultaten voor.

De waarden voor de primaire en seculaire Koppejan-zettingsparameters  $C_p$  en  $C_s$  zijn in het model voor de zandlagen aangenomen op 100 tot 200 respectievelijk 2000 tot 4000 (en lagere waarde voor het spanningstraject beneden de grensspanning). Dit zijn relatief lage waarden voor zand. Hoewel de holocene zanden overwegend kleiig zijn menen wij dat waarden voor de primaire constante van 400 tot 1200 eerder aan de orde zijn en voor de seculaire constante een zeer grote waarde gekozen zou moeten worden.

Tabel 8.4: Aangepaste tabel parameterwaarden tbv de second opinion Koppejan-berekeningen

laagtype	$\gamma_{\text{unsat}}$	$\gamma_{\text{sat}}$	$C_p$	$C_s$	$C_{pp}$	$C_{sp}$	$A_p$	$A_s$	$k/C_v$	$P_{cs}$	$vox$
"Zand 1"	18	18	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	7,00E-05	50	0
"Zand 2"	18	18	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	7,00E-05	50	0
"Zand 3"	19	19	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	5,00E-05	75	0
"Zand 4"	20	20	200	4000	100	1000	200	4,00E+08	1,00E-05	100	0
"Zand, kleiig 1"	17	17	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	50	0
"Zand, kleiig 2"	17	17	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	50	0
"Zand, kleiig 3"	17,5	17,5	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	75	0
"Zand, kleiig 4"	20	20	100	2000	70	900	100	2,00E+08	1,00E-06	100	0
"Klei 1"	15	15	40	400	10	60	40	4,00E+07	2,00E-07	50	0
"Klei 2"	15	15	40	400	10	60	40	4,00E+07	2,00E-07	50	0
"Klei 3"	15	15	40	400	10	60	40	4,00E+07	5,00E-09	50	0
"Klei 4"	16	16	75	600	20	100	75	6,00E+07	6,00E-07	75	0
"Klei 5"	18	18	80	1000	50	600	80	1,00E+08	5,00E-08	100	0
"Veen 1"	10	10	80	200	9	20	80	2,00E+07	1,00E-08	50	0,015
"Veen 2"	10	10	60	70	6	50	60	7,00E+06	1,00E-07	50	0,015
"Veen 3"	11	11	60	70	6	50	60	7,00E+06	1,00E-06	75	0,015
"Veen 4"	12	12	100	700	10	50	100	7,00E+07	5,00E-07	100	0,015
"Veen, kleiig 5"	11	11	60	70	6	50	60	7,00E+06	2,00E-07	50	0,015
"Veen, kleiig 6"	11	11	100	700	10	50	100	7,00E+07	5,00E-09	50	0,015
"Veen, kleiig 7"	12	12	100	700	10	50	100	7,00E+07	6,00E-07	75	0,015
"Veen, kleiig 8"	13	13	90	700	15	60	90	7,00E+07	5,00E-08	100	0,015

In de berekeningen volgens het nieuwe zettingsmodel wordt ook een factor  $vox$  voor de veenoxidatie meegenomen. Het is echter de vraag of deze invloed mag worden meegenomen zolang de veenlaag onder de grondwaterstand blijft.

In de ter controle uitgevoerde Koppejan-berekeningen voor de boorprofielen zijn de parameterwaarden in geringe mate aangepast. Het aantal lagen is sterk beperkt

aangezien maar voor een enkele typedoorsnede in een kleinere regio controleberekeningen werden uitgevoerd.

Voor de tweede set controleberekeningen zijn constanten RR en CR voor een berekening volgens Bjerrum gekozen. Deze constanten zijn rechtstreeks afgeleid uit de proefresultaten van de Spoorzone omdat deze proeven ook voor de belastingstoestand bij rijzing door toename van de grondwaterstand zijn uitgevoerd. De waarde voor  $C_a$  is zeer klein genomen om de kruipterm uit te schakelen aangezien deze het berekeningsresultaat vertroebelt. De berekeningen volgens Bjerrum zijn uitgevoerd omdat de geraadpleegde grondmechanisch experts een groter vertrouwen hebben in de uitkomsten van dergelijke berekeningen voor de bepaling van rijzingen dan bij toepassing van de methode van Koppejan.

Tabel 8.5: Parameterwaarden voor de controleberekeningen volgens Koppejan en Bjerrum

Type	laagbeschrijving
K <sub>1</sub>	(klei1) Klei, siltig, zandig
K <sub>2</sub>	(klei2) Klei, zandig
K <sub>4</sub>	(klei4) Klei
V <sub>k6</sub>	Veen, kleilig
V4	Veen, basis veen
Z <sub>k</sub>	Zand, kleilig, de eerste meters soms met puin
Z <sub>3</sub>	Zand, fijn tot middel
Z <sub>4</sub>	Zand, middel tot grof

	$\gamma_{\text{unsat}}$	$\gamma_{\text{sat}}$	$C_v$	$C_p$	$C_p'$	$C_s$	$C_s'$	$A_p$	$A_s$
K <sub>1</sub>	11,5	15,5	$3 \cdot 10^{-7}$	35	17,5	400	200	40	$4 \cdot 10^7$
K <sub>2</sub>	13,2	16,2	$6,4 \cdot 10^{-7}$	80	48	591	185	40	$4 \cdot 10^7$
K <sub>4</sub>	13,5	17,8	$6,5 \cdot 10^{-7}$	30	15	320	160	75	$6 \cdot 10^7$
V <sub>k6</sub>	10,7	11,6	$2,9 \cdot 10^{-7}$	41	13	270	39	100	$7 \cdot 10^7$
V4	12,6	15,1	$7,5 \cdot 10^{-8}$	20	10	80	40	100	$7 \cdot 10^7$
Z <sub>k</sub>	14,2	18,1	$1 \cdot 10^{-4}$	400	200	---	---	100	$2 \cdot 10^8$
Z <sub>3</sub>	17,7	18,5	$1 \cdot 10^{-2}$	400	200	---	---	200	$4 \cdot 10^8$
Z <sub>4</sub>	18,6	19,5	$1 \cdot 10^{-2}$	1200	600	---	---	200	$4 \cdot 10^8$

	RR	CR	$C_a$	$\sigma_p$ [kPa]
K <sub>1</sub>	0.028089	0.217225	1E-07	50
K <sub>2</sub>	0.005281	0.057565	1E-07	50
K <sub>4</sub>	0.005281	0.057565	1E-07	75
V <sub>k6</sub>	0.07357	0.113989	1E-07	50
V4	0.09	0.328941	1E-07	75
Z <sub>k</sub>	0.005281	0.057565	1E-07	50
Z <sub>3</sub>	0.000661	0.00915129	1E-07	75
Z <sub>4</sub>	0.000667	0.002	1E-07	100

## 8.5 Resultaten van de controleberekeningen

De resultaten van de te beoordelen zettingsberekeningen met het nieuwe model en de ligging van de controlepunten daarin zijn aangegeven in Figuur 8.2. De negatieve waarden duiden rijzing aan. In de figuur is te zien dat in de blauw gekleurde gebieden doorgaande zetting optreedt ondanks het stopzetten van de winning. Dit wordt veroorzaakt door het doorgaande fenomeen van de veenoxidatie.

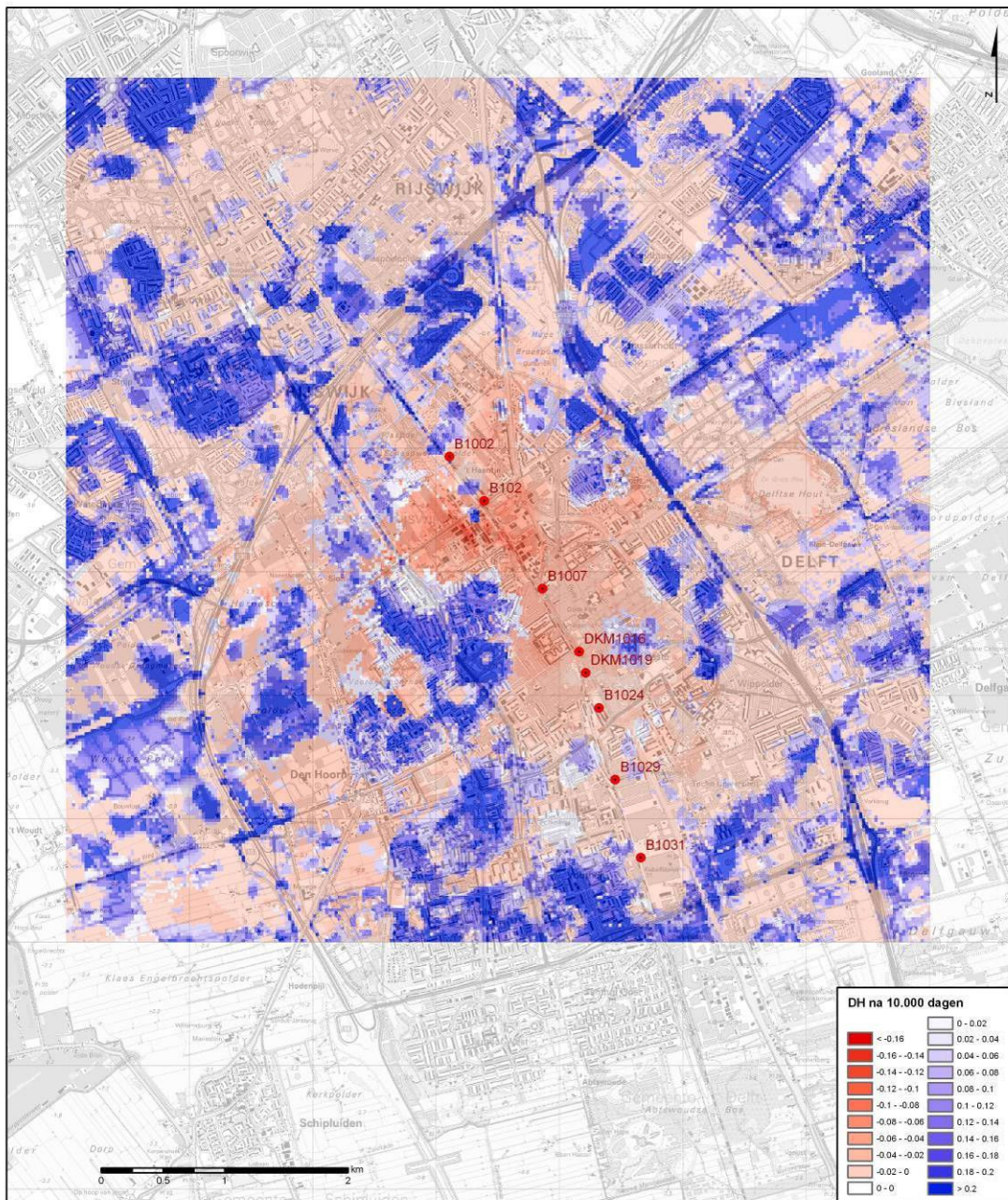
In de daarop volgende figuur (Figuur 8.3) zijn de resultaten zichtbaar als alleen naar de rijzing ten gevolge van grondmechanische consolidatie wordt gekeken. Daaruit kan worden geconcludeerd dat volgens berekening een rijzing van 10 cm en meer (max. 16 cm) slechts optreedt binnen de grenzen van het DSM terrein. Daarbuiten is de rijzing beperkt tot enkele centimeters.

In onderstaande tabel zijn alle resultaten van de diverse controleberekeningen samengevat. De tabel bevat de eindwaarden van de rijzingen in millimeter. Kolom 1 geeft de rijzingen zoals berekend door het zettingsmodel. De opbouw van de ondergrond t.p.v. het controlepunt is dus een schatting afkomstig uit het 3D model van de ondergrond. Kolom 2 en 3 geeft de berekende rijzing waarbij de bodemopbouw volgens de bekende boorprofielen is gebruikt. Tussen kolom 2 en 3 is het verschil gelegen in het gebruik van een andere rekenmethode, het verschil tussen kolom 1 en 2 wordt veroorzaakt door een andere opbouw van de ondergrond. De variatie van de rijzingen langs de lijn van de doorsnede komt voort uit de lokale samenstelling van de ondergrond en voor een beperkt deel door het effect van lokale polderpeilen.

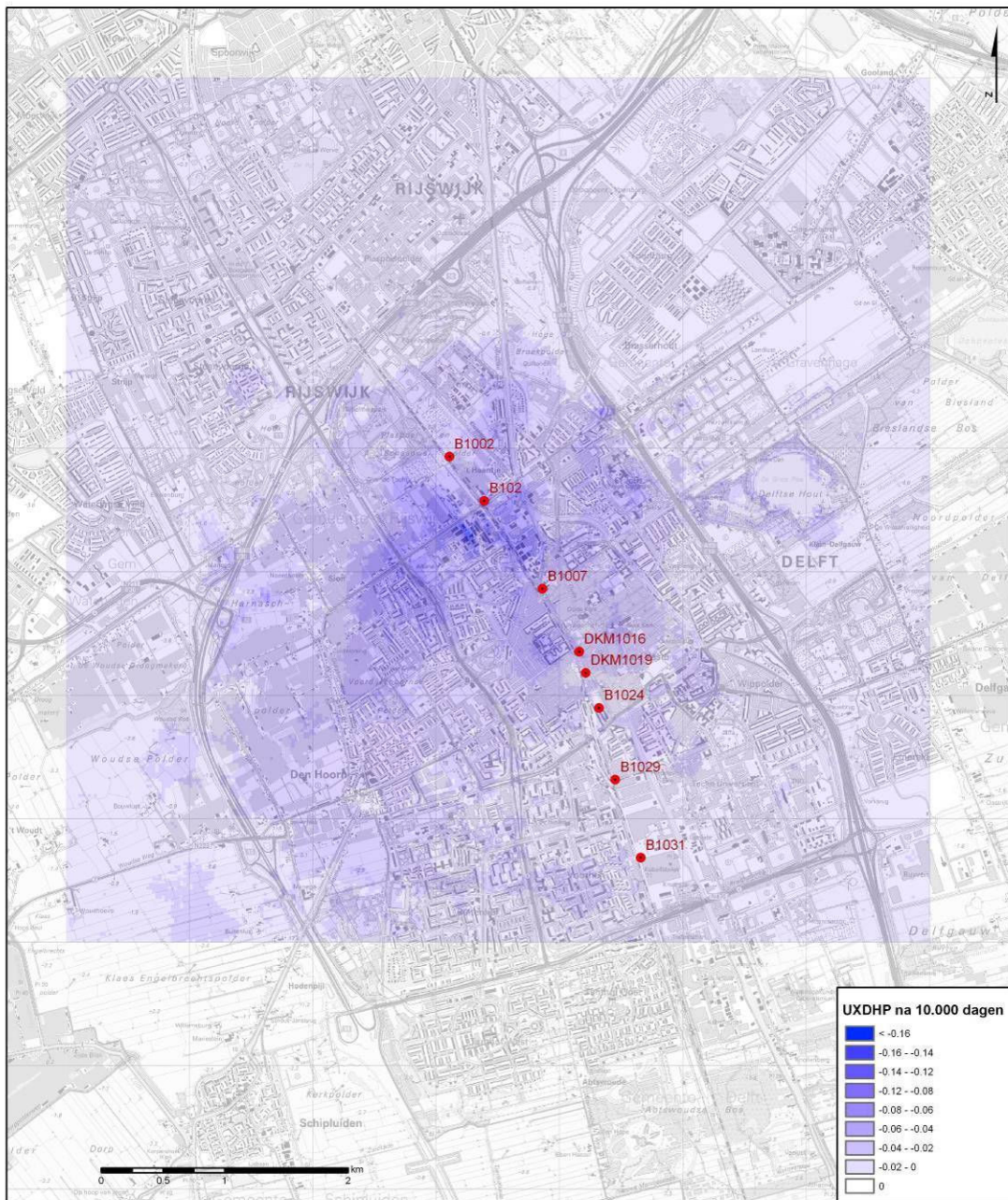
Tabel 8.6: Eindwaarden van rijzingen, resultaten van de diverse controleberekeningen.

Berekening rijzing [mm]	Nieuw zettingsmodel	MSettle boorprofielen	Msettle boorprofielen
controlepunt	Koppejan	Koppejan	Bjerrum
B102	63	55	20
B1002	31	53	12
B1007	40	46	25
DKM1016	30	47	18
DKM1019	19	35	8
B1024	20	53	22
B1029	11	35	9
B1031	8	36	16

Indien met de Koppejan-methode en de boorprofielen wordt gerekend is de resulterende rijzing groter dan de waarden uit het regionale model. Dit hangt samen met de ingevoerde (verbeterde) stijghoogteverschillen (tussen initiële en nieuwe situatie zonder DSM-onttrekking) waarin meer rekening wordt gehouden met een gelijkmatig verloop van de waterspanning over de dikte van de holocene lagen. Daarbij gaat het hier echter om 'spotcheck' en niet om een statistische vergelijking voor alle bekende boringen. In de resultaten van de Bjerrum-methode bestaat meer vertrouwen. De conclusie is dan ook dat er bij deze controlepunten globaal een overschatting wordt gemaakt van het rijzingseffect met de Koppejan-berekening door het nieuwe regionale model ten opzichte van de Bjerrum-methode in de orde van een factor 2.



Figuur 8.2: Resultaten van de rijzings/zettingsberekening volgens het nieuwe regionale zettingsmodel methode Koppejan bij stopzetting van de winning met aangegeven ligging van controlepunten



Figuur 8.3: Resultaten van de rijzingsberekening zonder veenoxidatie volgens het nieuwe regionale zettingsmodel methode Koppejan bij stopzetting van de winning met de ligging van controlepunten

## 9 Referenties

- Bremmer, C.N., G. de Lange, W. van der Linden, E. Veling & J. Veldkamp (2000), Bodemdaling en integraal waterbeheer. TNO-rapport NITG 03-200-A, 100 p.
- De Mulder, E.F.J., M.C. Geluk, I.L. Ritsema, W.E. Westerhoff en T.E. Wong (2003). De ondergrond van Nederland, Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Utrecht, 379 pp.
- Koppejan, A.W., 1948. A formula combining the Terzaghi load compression relationship and the Buisman secular time effect. Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., Rotterdam, 3, pp. 32-38.
- Kruidhof, C.N., B. Jansen & P.C. Vos, 2006. Plangebied A4 Delft-Schiedam, gemeente Schipluiden, Schiedam en Vlaardingen. Archeologisch vooronderzoek: een bureau- en inventariserend veldonderzoek (verkenning). RAAP Archeologisch Adviesbureau, RAAP-Rapport 1330, 82 pp.
- McDonald, M.G. en Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model
- Staalduinen, C.J. van, 1979. Toelichting bij de geologische kaart van Nedserland 1:50.000. Blad Rotterdam West (37W), Rijks Geologische Dienst, Haarlem.
- Vos, P.C., F.P.M. Bunnik & H. de Wolf, 2005. Geolandschappelijk onderzoek bij het archeologisch proefsleufonderzoek Hoekpolder (Rijswijk, Z-H) TNO-rapport NITG-05-170-B, 27 pp.
- Zagwijn W.H., en C.J. Staalduinen 1975. Toelichting bij geologische overzichtskaarten van Nederland Rijks Geologische Dienst, Haarlem





# Addendum

Dit addendum geeft uitleg rond de modelaanpassing die heeft plaatsgevonden met betrekking tot het onderdeel Neerslag.

## **Modelaanpassing**

De stationaire grondwateraanvulling wordt afgeleid uit de niet stationaire grondwateraanvulling over een periode van 10 jaar. Deze niet-stationaire berekening wordt gevoed door neerslag- en verdampingsgegevens op dagbasis, afkomstig van meetstation Rotterdam. Gebleken is dat er fouten in de ingelezen neerslagreeks zaten. Op sommige dagen is de neerslagwaarde een factor 100 kleiner ingelezen, 9 mm/dag wordt bijv. ingelezen als 0,09 mm/dag. Dat leidt er toe dat voor de rekenperiode van 10 jaar de neerslag gemiddeld 10% te laag is. De verdampingsreeks is wel correct.

## **Upgrade / welke aanpassing is doorgevoerd**

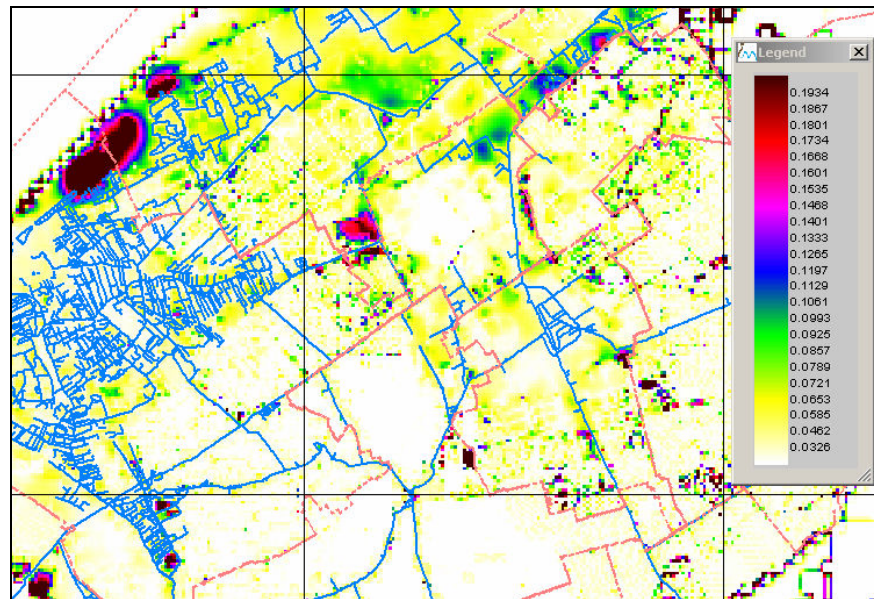
De invoerfile waarin de tijdreeksen voor neerslag en verdamping zijn opgenomen is gecorrigeerd voor de fouten. Concreet betreft het de file *mete\_sim.inp*, die invoer is voor Capsim, het deel van de rekenmodule dat berekeningen uitvoert voor de onverzadigde zone.

## **Wat zijn de gevolgen voor het model en de uitkomsten?**

Grotere neerslag heeft een toename van de grondwateraanvulling tot gevolg. Ten opzicht van de vorige versie van de grondwateraanvulling blijkt het grondwatermodel ongeveer 12% meer grondwateraanvulling te krijgen.

Wat is het effect daarvan op de grondwaterstand? Meer grondwateraanvulling betekent een hogere grondwaterstand t.g.v. een grotere opbolling van de grondwaterstand. Die blijkt met name groter in gebieden met minder (polder)waterlopen zoals delen van Den Haag en het duingebied.

Ten opzicht van het eerder uitgeleverde model wijkt de freatisch grondwaterstand in Delft en omliggende gemeenten niet veel af, gemiddeld enkele centimeters (zie figuur 1). In enkele gebieden kan het verschil oplopen naar 10 of 15 centimeter. Dat is bijvoorbeeld het geval in een zone van +/- 500m ten noorden van de Trekvliet/Zuidvliet. Een ander gebied is een oostelijk deel van Wateringse Veld en de Schildersbuurt en noordelijk daarvan.



Figuur 1: Toename grondwaterstand (stationair) t.g.v. toename in neerslag [m]

Het effect op de diepere stijghoogte is zeer gering; een toename van 6 cm in de kern van de onttrekking en 1,5 cm erbuiten.

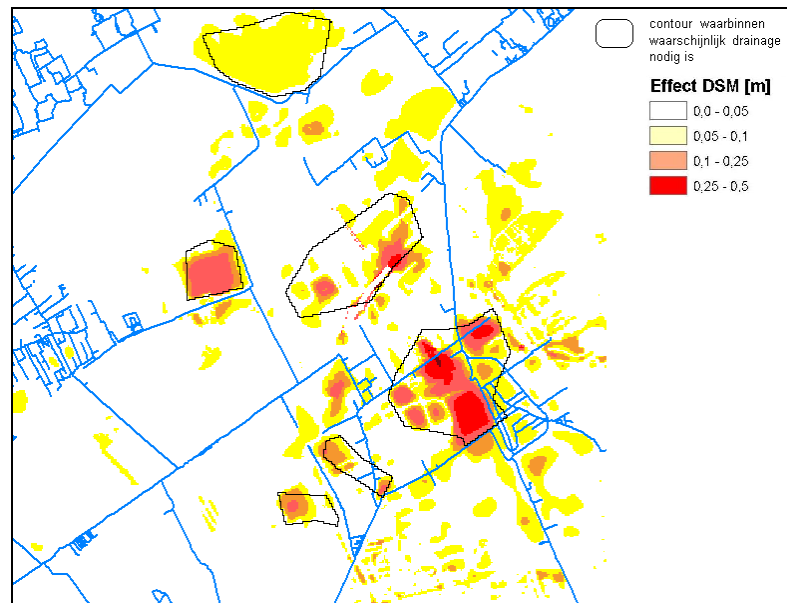
Vergelijken we de waterbalans voor het centrumgebied van 10x10 km dan blijkt dat de hogere grondwateraanvulling het gebied nagenoeg geheel verlaat via het topsysteem van drains en waterlopen.

De genoemde verschillen zijn geen aanleiding om de ijking opnieuw uit te voeren. Allereerst liggen slechts weinig meetpunten die bij de ijking zijn gebruikt op de genoemde plekken met de grootste veranderingen. De ijking kan dus niet sterk worden bijgesteld. Daarnaast lagen bij de start van de ijking de freatische grondwaterstanden gemiddeld aan de hoge kant. In het ijkingsproces is dat bijgesteld door de doorlatendheid omhoog bij te stellen. Het model wordt nu natter en zou die parameter in principe nog meer willen bijstellen maar gebleken is dat de ijking niet meer ruimte kan/mag geven. De afwijking tussen metingen en berekende waarden worden iets groter maar ook dat gaat maar om een enkele centimeter, geen aanleiding om de ijking opnieuw uit te voeren.

Mogelijk belangrijker is de vraag of de berekende effecten door sluiting van de winning nog wel correct zijn.

- Zoals genoemd heeft de verandering geen effect op de diepere stijghoogte en daardoor zeker niet op de effectberekening in het eerste watervoerende pakket. De inschatting voor schade aan kades zal daardoor niet wijzigen;
- Deze geringe toename van de grondwateraanvulling heeft, als het al significantie invloed heeft, in ieder geval een gunstige invloed op de waterkwaliteit. Het opkwellende brakke water wordt immers meer verdund;

- De freatische grondwaterstand neemt toe door de toename van de grondwateraanvulling. De verwachting is dat de berekende effecten van sluiting van de winning een geringe daling zullen vertonen. Een hogere grondwaterstand zal namelijk eerder worden 'afgetopt' door bijv. drainage. Figuur 2 geeft het nieuwe patroon van het te draineren gebied



Figuur 2: Effect op de grondwaterstand door sluiting van de winning in de situatie met de nieuwe neerslag

In de figuur zijn de zogenaamde 'zoekgebieden' aangegeven die indertijd op basis van de eerste uitkomsten zijn aangewezen en waarbinnen drainage noodzakelijk zou zijn. Het blijkt dat deze zoekgebieden over het geheel genomen niet significant verschillen qua omvang (oppervlak) en grootte van het effect. Het areaal te draineren gebied, en daarmee de geschatte kosten, zullen dan ook niet significant afwijken.

De verwachting is dat de effecten van winningreductie minder worden dan in de oude situatie. Op plekken is het effect wel groter. De voornaamste reden is dat op die locaties naderhand de verbeterde drainage (diepte) is ingebracht zoals beschreven in het hoofdstuk drainage (H. II-5).

Een toelichting bij enkele andere punten:

- De noordpunt van de Harnaspolder bij de RWZI en in het centrum bij het kassengebied nemen in effect en enigszins in omvang toe maar zijn niet aangemerkt als probleemgebied;
- Door een gewijzigd modelconcept voor spoortunnel bij Rijswijk en de verdiepte A4 is in de driehoek tunnel-A4 het effect van de winning minder maar voor een groot deel van het oppervlak nog wel boven de 'drainagenorm' van 5 cm effect;
- Het gebied binnen de wijk Wateringseveld lijkt een groter effect te ondervinden. Het gebied was al meegenomen als zoekgebied maar het effect van de winning lijkt sterker. Opgemerkt wordt dat het nieuwe waterlopenstelsel van de wijk niet in het bestand van het waterschap aanwezig is. In de praktijk zal door bouwrijp maken en het nieuw aangebrachte oppervlaktewater het effect van de winning naar verwachting geringer zijn.

**Wat betekent dit voor de oplevering van het model?**

Op basis van bovenstaande blijkt dat de effecten op de uitkomsten van het onderzoek zeer gering zijn. De conclusies zoals in beide rapportages zijn vermeld worden niet bijgesteld.

Het grondwatermodel is op het punt van de neerslag aangepast, onder andere om de verschillen te kunnen berekenen. Deze wijziging zal definitief worden doorgevoerd in het basismodel en ook met de uitlevering van het model worden meegenomen.