



Vrije Universiteit Brussel

ONTWIKKELING VAN REGIONALE MODELLEN TEN BEHOEVE VAN HET VLAAMS GRONDWATER MODEL (VGM) IN GMS/MODFLOW. PERCEEL 1: CENTRAAL KEMPISCH SYSTEEM

DEELRAPPORT 2: OPBOUW VAN HET GRONDWATERSTROMINGSMODEL,
GEVOELIGHEIDSANALYSE EN KALIBRATIE



OPDRACHTGEVER:

Studie in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
Departement Leefmilieu en Infrastructuur
Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer, Afdeling Water

AUTEURS: B. Verbeiren, O. Batelaan & Prof. F. De Smedt
Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde
Vrije Universiteit Brussel (VUB), Pleinlaan 2, 1050 Brussel

NOVEMBER 2006

INHOUDSTABEL

1.	ZIE DEELOPDRACHT 1	6
2.	ZIE DEELOPDRACHT 1	6
3.	OPBOUW GRONDWATER-MODEL	6
3.1.	CONCEPTUEEL MODEL	6
3.2.	SOFTWARE	7
3.3.	MODELSTRUCTUUR	8
3.3.1.	BESCHRIJVING VAN HET MODEL	8
3.3.2.	HYDROGEOLOGISCH CONCEPT	8
3.3.3.	DIGITAAL HOOGTEMODEL	10
3.4.	RANDVOORWAARDEN	11
3.4.1.	RANDVOORWAARDEN AAN DE RAND VAN HET MODELGEBIED (BOUNDARY-CONDITIES)	11
3.4.2.	HYDROGRAFIE (RIVER-CONDITIES)	13
3.4.3.	DRAINAGE (DRAIN-CONDITIES)	14
3.4.4.	GRONDWATERWINNINGEN (WELL-CONDITIES)	15
3.4.5.	GRONDWATERVOEDING (RECHARGE)	16
3.5.	HYDRAULISCHE PARAMETERS	18
4.	GEVOELIGHEIDSANALYSE	22
4.1.	HYDRAULISCHE DOORLATENDHEID	23
4.2.	GRONDWATERVOEDING	31
4.3.	RANDVOORWAARDEN AAN DE RAND VAN HET MODELGEBIED	33
4.4.	GRONDWATERWINNINGEN	33
4.5.	DRAINAGE	35
4.6.	WATERLOPEN	37
4.7.	STROMINGSRANDVOORWAARDE DIESTIAANGEUL	40
4.8.	GECOMBINEERD EFFECT	42
4.9.	SAMENVATTING GEVOELIGHEIDSANALYSE	46
5.	KALIBRATIE	47
5.1.	STIJGHOOGTE OPSERVATIEPUNTEN	51
5.2.	WATERBALANS	62

LIJST MET FIGUREN

Figuur 3.1: Schematische opbouw van de modellagen.....	9
Figuur 3.2: Randvoorwaarden aan de rand van het CKS-model.....	12
Figuur 3.3: Overzicht verwerking en toekenning riviergegevens.....	14
Figuur 3.4: Gemeten versus berekende stijghoogten voor (licht) en na (donker) correctie van de drainagepeilen voor Antwerpen-stad	15
Figuur 3.5: Grondwatervoeding berekend met WetSpass (Meyus et al., 2004b) (grid: 250 x 250 m)	17
Figuur 3.6: Zones met verschillende hydraulische doorlatendheid voor modellaag1 (HCOV 0100)	19
Figuur 3.7: Hydraulische doorlatendheid voor modellaag2 (HCOV 0220).....	20
Figuur 4.1: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor Kmin. HCOV 0250 (i.e. 3 m/d): h_s minus $h_{referentie}$	26
Figuur 4.2: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor Kmax. HCOV 0250 (i.e. 30 m/d): h_s minus $h_{referentie}$	27
Figuur 4.3: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor Kmin. HCOV 0230 (i.e. 4 m/d): h_s minus $h_{referentie}$	28
Figuur 4.4: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor Kmax. HCOV 0230 (i.e. 40 m/d): h_s minus $h_{referentie}$	29
Figuur 4.5: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor Kmax. HCOV 0100 (i.e. 1 m/d): h_s minus $h_{referentie}$	30
Figuur 4.6: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor een afname van de grondwatervoeding met 25%: h_s minus $h_{referentie}$	32
Figuur 4.7: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie bij een verlaging van de pompingsdebiëten in de winningen met 25%: h_s minus $h_{referentie}$	34
Figuur 4.8: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 5 verlaging in drainconductantie: h_s minus $h_{referentie}$	36
Figuur 4.9: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een verdubbeling van de rivierconductanties: h_s minus $h_{referentie}$	38
Figuur 4.10: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een halvering van de rivierconductanties: h_s minus $h_{referentie}$	39
Figuur 4.11: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor een halvering van de stromingsrandvoorwaardeconductantie: h_s minus $h_{referentie}$	41
Figuur 4.12: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor een combinatie van HK_5 = 3 m/d en HK_3 = 4 m/d : h_s minus $h_{referentie}$	43
Figuur 4.13: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor een combinatie van minimale doorlatendheden (HK_5 = 3 m/d en HK_3 = 4 m/d) en een toename van de grondwatervoeding met 10%: h_s minus $h_{referentie}$	45
Figuur 5.1: Overzicht van de observatiepunten per modellaag die gebruikt werden bij de kalibratie.....	49
Figuur 5.2: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 1	52

Figuur 5.3: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 2	52
Figuur 5.4: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 3	53
Figuur 5.5: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 4	53
Figuur 5.6: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 5	54
Figuur 5.7: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 1, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de afwijking weergeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m.....	56
Figuur 5.8: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 2, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m	57
Figuur 5.9: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 3, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m	58
Figuur 5.10: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 4, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m	59
Figuur 5.11: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 5, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m	60
Figuur 5.12: Gesimuleerd freatisch peil [m] onder maaiveld (=DHM Vlaanderen).....	61
Figuur 5.13: De bijdrage van de verschillende IN/OUT componenten tot de totale waterbalans van het model.....	62

LIJST MET TABELLEN

Tabel 3.1: Overzicht van de K-waarden. Voor de benamingen van de HCOV-eenheden wordt verwezen naar Tabel .	18
Tabel 3.2: Hydraulische doorlatendheden HCOV 0100	19
Tabel 3.3: Hydraulische doorlatendheden HCOV 0220	20
Tabel 4.1: K-parameters gerangschikt volgens gevoeligheid op basis van de 'composite scaled sensitivity' CSS	22
Tabel 4.2: Relatieve gevoeligheid S_r van de hydraulische parameters (HK) per modellaag ..	23
Tabel 4.3: Rangschikking van de hydraulische parameters (HK) op basis van de totale relatieve gevoeligheid S_r	23
Tabel 4.4: Stijghoogteverschil ten gevolge van een verandering van de hydraulische doorlatendheden (HK) van modellagen 5 en 3; afzonderlijk en gecombineerd.....	40
Tabel 4.5: Stijghoogteverschil ten gevolge van een verandering van de hydraulische doorlatendheden (HK) van modellagen 5 en 3 en van de grondwatervoeding ($\pm 10\%$); afzonderlijk en gecombineerd.....	42
Tabel 5.1: Overzicht van het aantal observatiepunten per modellaag in het modelgebied gebruikt bij de kalibratie	45
Tabel 5.2: Optimale K-waarden	48
Tabel 5.3: Resultaten modelkalibratie	49
Tabel 5.4: Totale waterbalans, met de afzonderlijke bijdrage van elke IN/OUT component ..	49

1. ZIE DEELOPDRACHT 1

2. ZIE DEELOPDRACHT 1

3. OPBOUW GRONDWATER-MODEL

3.1. CONCEPTUEEL MODEL

Het modelgebied is verticaal beperkt tot de Quartaire en Tertiaire sedimenten behorende tot de hydrogeologische hoofdeenheden de Quartaire Aquifersystemen (HCOV 0100) en het Kempens Aquifersysteem (HCOV 0200) en wordt onderaan begrensd door de afsluitende kleilaag gevormd door de Boom Aquitard (HCOV 0300). Horizontaal is het studiegebied omvat in een rechthoek van 101 km bij 77 km (oppervlakte van 7777 km²).

In het Vlaamse gedeelte van het studiegebied liggen de randvoorwaarden voor de hand, namelijk rivieren met gekend waterniveau of grondwater-scheidingslijnen, zoals het dagzomen van de klei van Boom of de waterscheidingslijn tussen het Schelde- en Maasbekken. Voor het gedeelte in Nederland zijn er in het studiegebied geen duidelijke randvoorwaarden te vinden en wordt het modelgebied begrensd tot het VGM-karteergebied. De resultaten van het NAGROM (Nederlands Algemeen Grondwater Model) werden gebruikt voor het definiëren van een randvoorwaarde.

Gezien de numerieke stabiliteit van het model en de huidige capaciteit van de hardware lijkt het aangewezen om de totale grootte van het model te beperken tot minder dan enkele honderdduizend rekencellen. Hiertoe werden, voor de verticale indeling van het model, de verschillende hydrogeologische lagen gegroepeerd in relevante sub-/hoofdeenheden of aquifers. Hiervan uitgaande werd een model opgebouwd met een celresolutie van 250 bij 250 m en vijf modellagen, hetgeen resulteert in ongeveer 370.000 (actieve) cellen. Een stationaire ('steady state') grondwatermodellering werd uitgevoerd voor het referentiejaar 2000.

3.2. SOFTWARE

De grondwatermodellering gebeurt met behulp van GMS 6.0 (Groundwater Modelling System) (Brigham Young University – Utah, USA, 2003).

De originele versie van MODFLOW (MODular groundwater FLOW model), ter beschikking gesteld door de U.S. Geological Survey, bevat enkel het rekenprogramma zonder enige grafische uitvoermogelijkheden. Sinds een aantal jaar worden een reeks (commerciële) meer gebruiksvriendelijke implementaties aangeboden, met een interactieve omgeving met pre- en post-processoren. Eén van de meest uitgebreide en ontwikkelde geïntegreerde pakketten voor grondwatermodellering is GMS. GMS integreert MODFLOW, MODPATH, FEMWATER, MT3DMS, SEAM3D, SEEP2D, UTCHEM en PEST. De huidige versie 6.0 werkt met MODFLOW-2000 (Harbaugh & McDonald, 2000).

MODFLOW is ontwikkeld door de U.S. Geological Survey (McDonald & Harbaugh, 1988; McDonald & Harbaugh, 2000) en is wereldwijd één van de meest gebruikte grondwatermodellen. MODFLOW is een driedimensionaal eindige verschillen grondwatermodel en is opgebouwd uit afzonderlijke modules die elk een onderdeel van de hydrologische processen (o.a. onttrekkingen, grondwatervoeding, drainage, rivieren, etc.) beschrijven en elk instaan voor een bepaald onderdeel van de in- en uitvoer van het model.

De grondwaterstroming in MODFLOW wordt beschreven door volgende differentiaal-vergelijking:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \pm W = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

waarbij x , y en z de ruimtelijke coördinaten zijn [L], t de tijd [T], h de te berekenen grondwaterpotentiaal [L], K_x , K_y en K_z de drie componenten van de hydraulische geleidbaarheid [L/T], W de externe bronnen en/of afvoeren [T⁻¹] en S de bergingscoëfficiënt [L⁻¹].

De grondwaterstromingsvergelijking wordt opgelost met een eindige verschil benadering, door het modelgebied op te delen in rekencellen met een grootte die afhankelijk is van de gewenste nauwkeurigheid en/of van de rekencapaciteit. De vergelijkingen worden iteratief opgelost (Anderson & Woessner, 1992). Verschillende oplossingsmethoden ('solvers') zijn beschikbaar voor de numerieke oplossing van de differentiaal-vergelijkingen.

3.3. MODELSTRUCTUUR

3.3.1. BESCHRIJVING VAN HET MODEL

De grenzen van het model, in Lambert-coördinaten [m], zijn:

X-min – X-max: 138.000 – 239.000

Y-min – Y-max: 174.000 – 251.000

Het model is 101 bij 77 km of 7.777 km² groot. De celgrootte bedraagt 250 bij 250 m over het hele modelgebied. Dit resulteert in een modelraster met 308 rijen en 404 kolommen. Een groot aantal cellen is echter inactief waardoor het effectief te modelleren gebied kleiner is, namelijk ongeveer 4.620 km².

3.3.2. HYDROGEOLOGISCH CONCEPT

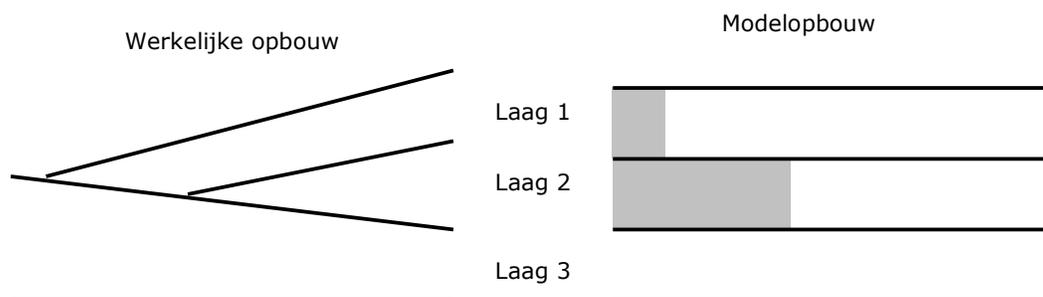
Voor de vijf modellagen werden de hydrogeologische subeenheden HCOV 0100, HCOV 0220, HCOV 0230, HCOV 0240 en HCOV 0250 verondersteld. Hierbij gaan we uit van de praktische overweging dat aquifers en aquitards volledig moeten overeenkomen met welbepaalde modellagen. Dergelijke werkwijze zal toelaten om het overzetten van de hydraulische karakteristieken naar modellagen te vergemakkelijken en achteraf modelresultaten eenvoudig om te zetten naar de corresponderende relevante hydrogeologische eenheden.

GMS 6.0 biedt verschillende, zogenaamde “true layer”, pakketten aan die de grondwaterstroming doorheen modellagen heen simuleert, met name: Layer Property Flow (LPF) en Hydrogeologic Unit Flow (HUF). In beide gevallen wordt de top en basis van elke modellaag (overeenkomend met reële hydrogeologische eenheden) ingelezen en kunnen eveneens de hydraulische karakteristieken per laag ingegeven worden. Het HUF-pakket maakt een verdere virtuele subindeling, zogenaamde HUF-eenheden met specifieke hydraulische karakteristieken, voor elke laag mogelijk.

De beperkte gegevensbeschikbaarheid voor een aantal van deze subeenheden, de instabiliteit van het model en de bovendien verhoogde complexiteit dat het gebruik van het HUF-package met zich zou meebrengen voor de kalibratie van het model, deed ertoe beslissen om gebruik te maken van het LPF-pakket en slechts voor modellagen 1 en 2 ruimtelijk verdeelde hydraulische karakteristieken toe te kennen (zie paragraaf 3.5). Voor de modellagen 3 t.e.m. 5 wordt dus 1 parameter per modellaag gedefinieerd.

De modellagen en de corresponderende grondlagen dienen gedefinieerd worden over het ganse studiegebied. Op de plaatsen waar bepaalde hydrogeologische eenheden uitwigen,

worden gepaste maatregelen genomen in de overeenkomstige modellaag. Dit kan eenvoudig verwezenlijkt worden door de modellaag op deze plaatsen (grijze zones in Fig. 3.1) zeer dun (0,10 m) te maken met aangepaste hydraulische eigenschappen, met name een zeer lage horizontale doorlatendheid (10^{-4} m/d) in combinatie met een zeer hoge verticale doorlatendheid (10^4 m/d). Op die locatie maakt deze aldus als het ware deel uit van de onderliggende modellaag en wordt de verbinding tussen de bovenliggende en de onderliggende rekenlagen verzekerd. Deze werkwijze heeft geen invloed op de numerieke nauwkeurigheid van het model. Het principe van deze werkwijze wordt schematisch weergegeven in 2.



Figuur 3.1: Schematische opbouw van de modellagen: Principe van de opbouw van de modellagen overeenkomstig de werkelijke opbouw van de modellagen; in het grijs worden de zones aangegeven met een kleine dikte en een lage horizontale en hoge verticale doorlatendheid.

De opbouw van het model in modellagen kan als volgt worden geschematiseerd:

- Modellaag 1: Quartaire Aquifersystemen (HCOV 0100)
- Modellaag 2: Klei-zand-complex van de Kempen (HCOV 0220)
- Modellaag 3: Pleistoceen en Pliocene Aquifer (HCOV 0230)
- Modellaag 4: Pliocene kleiige laag (HCOV 0240)
- Modellaag 5: Mioceen Aquifersysteem (HCOV 0250)

In het uiterste zuidoosten en het oosten van het modelgebied komen een reeks breuken voor. Deze kleinere breuken zijn echter van weinig belang voor de grondwatermodellering in het studiegebied. De breuken komen immers enkel tot uiting als een trap in de basis van de desbetreffende modellaag en zijn aldus opgenomen in de modelopbouw. Er worden geen andere modellagen afgesloten, zodat het effect van de aanwezigheid van deze breuken eerder beperkt is. Daar het ook meestal om goeddoorlatende zandlagen gaat blijft het hydraulisch contact over deze kleine breuken gegarandeerd, zodat een herindeling van de modellagen niet noodzakelijk was.

3.3.3. DIGITAAL HOOGTEMODEL

Voor het Vlaamse deel werd een beroep gedaan op het door OC GIS-Vlaanderen recent (voorjaar 2005) ter beschikking gestelde Digitaal Hoogtemodel (DHM, resolutie: 25x25 m). Het DHM is gebiedsdekkend beschikbaar voor heel Vlaanderen met uitzondering van een aantal stedelijke gebieden en enkele individuele cellen. De individuele 'no data' cellen werden opgevuld op basis van een interpolatie van de omliggende cellen. De grotere zones met ontbrekende data werden opgevuld met data uit het digitaal hoogtemodel aangemaakt in het kader van de HCOV-kartering (resolutie: 100x100 m – lichte verschuiving). Laatstgenoemde werd vooraf eveneens omgezet naar een 25x25 m raster via een 'nearest neighbour' resampling.

Voor het Nederlands deel werd het Actueel Hoogtebestand Nederland gebruikt (AHN, resolutie: 25x25 m - Rijkswaterstaat Nederland, 2000). Dit hoogtebestand vertoonde een lichte verschuiving, waaraan werd verholpen via een resampling met de 'nearest neighbour' optie.

Het DHM en het AHN werden vervolgens gecombineerd en omgezet naar een raster met resolutie 250x250 m. Hierbij werd de gemiddelde waarde per 250 bij 250 m modelcel beschouwd, die berekend werd op basis van 100 cellen uit het 25x25 m raster. Op deze manier werd een gebiedsdekkend digitaal hoogtemodel voor het hele modelgebied opgebouwd. Dit digitaal hoogtemodel werd gebruikt voor de berekening van het drainagepeil (zie verder, paragraaf 3.4.2), en is dus in belangrijke mate bepalend als randvoorwaarde.

Opmerking: Voor de top van modellaag 1 in GMS werd besloten om het DHM uit de HCOV-kartering in combinatie met het AHN te gebruiken om mogelijke inconsistenties t.a.v. de onderliggende geologische basissen te vermijden. De werkwijze verliep analoog: (1) 'nearest neighbour' resampling van het digitaal hoogtemodel uit de HCOV-kartering van 100 m-resolutie naar 25 m-resolutie, (2) samenvoeging met AHN (25 m-resolutie), en (3) omzetting naar raster met resolutie 250x250 m door het berekenen van de gemiddelde waarde per 250x250 m rastercel.

Een vergelijking van de berekende grondwaterstanden t.o.v. het maaiveld is dus enkel zinvol indien dit gebeurt aan de hand van het recent Vlaams DHM!

3.4. RANDVOORWAARDEN

3.4.1. RANDVOORWAARDEN AAN DE RAND VAN HET MODELGEBIED

(BOUNDARY-CONDITIES)

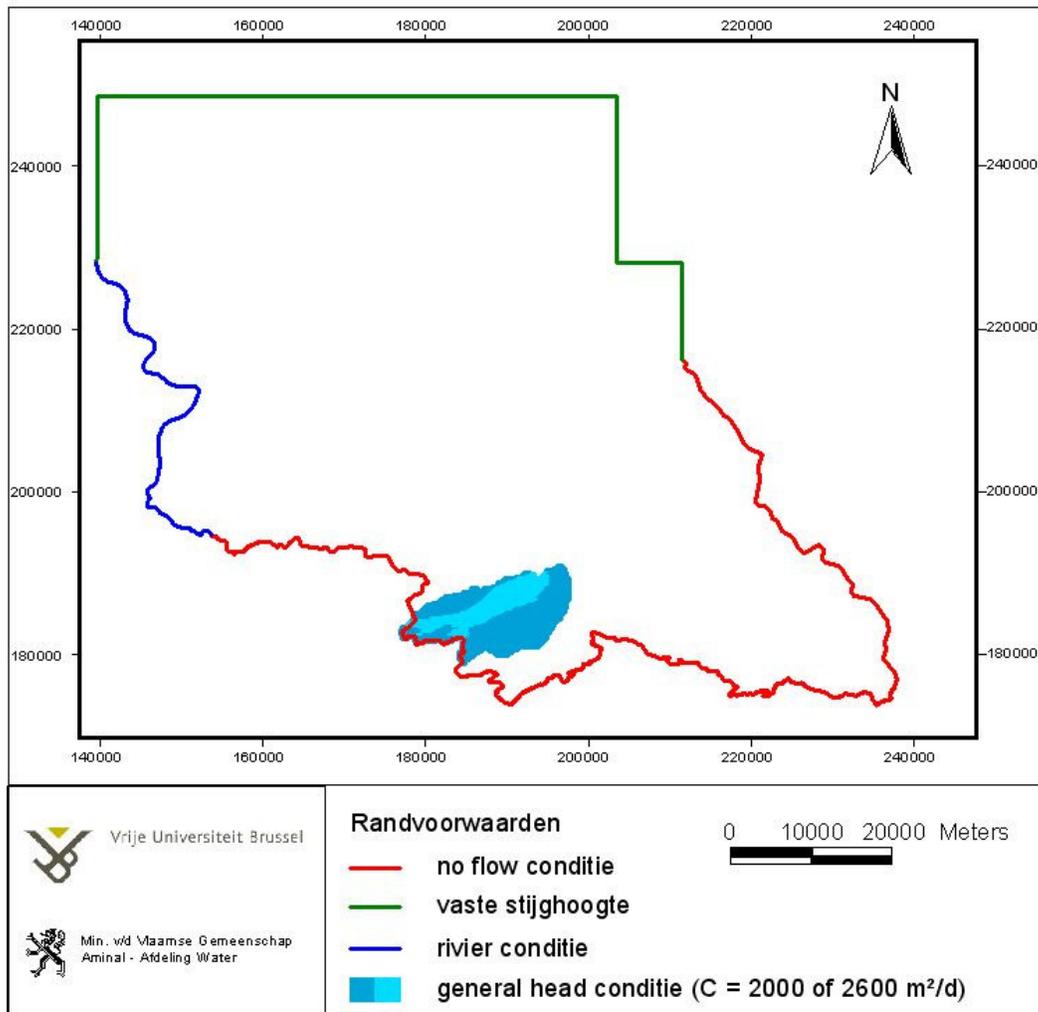
In het Vlaams gedeelte vallen de modelgrenzen samen met fysieke grenzen. De waterscheiding tussen Maas- en Scheldebekken vormt de oostelijke modelgrens en werd voor de modellagen 1 t.e.m. 5 gedefinieerd als een ondoorlatende grens ('no flow boundary'). De zuidelijke modelgrens stemt overeen met het opduiken van de Boomse klei, vormt een grondwaterscheiding en werd eveneens voor laag 1 t.e.m. 5 gedefinieerd als ondoorlatend. In het westen vormt de Schelde de grens van het model over een lengte van ongeveer 50 km. Deze werd gedefinieerd als rivier randvoorwaarde ('RIVER boundary'). Hetzelfde geldt voor de Oosterschelde over een lengte van 17 km iets noordelijker. De toekenning aan de verschillende modellagen (1 t.e.m. 5) gebeurde op basis van het rivierpeil en het bodempeil. De onderliggende lagen werden als ondoorlatend gedefinieerd, gezien aangenomen wordt dat het grondwater niet onder de (Ooster)Schelde doorstroomt in de lagen boven de Boom aquitard.

Aan de noordelijke modelgrens, die overeenstemt met de rand van het VGM-karteringsgebied, werd voor de modellagen 1 t.e.m. 5 een vaste stijghoogte opgelegd. De 'constant head' waarde werd berekend via een interpolatie op basis van (1) beschikbare observatiepunten, (2) rivierpeilen op de rand en (3) de resultaten van het Nederlands Algemeen Grondwater Model (NAGROM). Bij deze interpolatie werd rekening gehouden met de aan- of afwezigheid van de scheidende modellaag 4 (HCOV 0240). In geval van afwezigheid van de subeenheid 0240 werd geen onderscheid gemaakt voor de vaste stijghoogte in modellaag 5. Voor de gemeenschappelijke grens met het Maas-model werd echter enkel een beroep gedaan op de geïnterpoleerde stijghoogten van de nabijgelegen peilbuizen. Figuur 4 geeft de randvoorwaarden in het modelgebied weer.

Ter hoogte van de Diestiaangeul, waar de onderste afsluitende Boom aquitard (HCOV 0300) weggeërodeerd is, staat het Centraal Kempisch Systeem in hydraulisch contact met het onderliggende Brulandkrijtsysteem. In deze zone was het de bedoeling om de modelresultaten van het Brulandkrijtsysteem als randvoorwaarde te gebruiken. Deze waren echter nog niet beschikbaar. Daarom werd een beroep gedaan op een grondwatermodel voor een deel van de Demer-vallei (Soresma, 2004). Voor deze zone (in het blauw op Figuur 3.2) werd een stromingsrandvoorwaarde ('General head boundary') opgelegd. Naast de peilen werd eveneens een conductantie (C) opgelegd. Deze werd berekend op basis van de gemiddelde diktes (D) en de gemiddelde verticale hydraulische conductiviteiten (K) voor de sub-eenheid 0250 en het onderliggende pakket.

$$C = \frac{BL}{\frac{\frac{1}{2}D_1}{K_1} + \frac{\frac{1}{2}D_2}{K_2}}$$

met B en L de lengte en breedte van een rekencel. In deze zone staat de sub-eenheid 0250 in contact met 0400 (donker) en 0600 (licht). Als gemiddelde conductantie werd respectievelijk 2000 m²/d en 2600 m²/d verondersteld.



Figuur 3.2: Randvoorwaarden aan de rand van het CKS-model.

3.4.2. HYDROGRAFIE (RIVER-CONDITIES)

De rivieren en kanalen werden in het grondwatermodel opgenomen met behulp van de riviermodule (RIVER package). Met deze module kan de waterstroming tussen een watervoerende laag en een boven- of onderliggende bronreservoir zoals een rivier, kanaal, meer of plas gesimuleerd worden. Hierbij wordt zowel de stroming van als naar het reservoir beschouwd.

De conductantie C van het stroombed wordt berekend uitgaande van de lengte L [L] en breedte B [L] van de waterloop in de betreffende modelcel, en de dikte D [L] en hydraulische geleidbaarheid K [L /T] van de sedimentbodem:

$$C = \frac{KBL}{D}$$

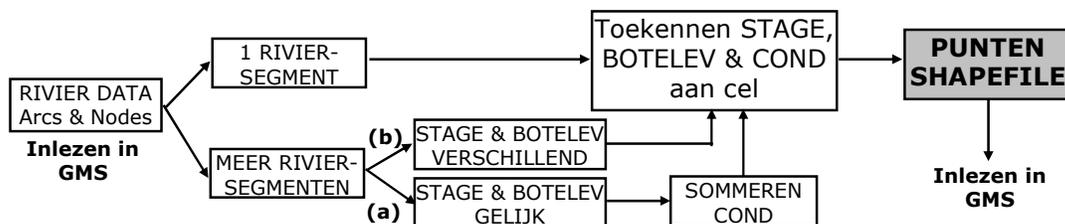
De stroming Q [L³/T] tussen de waterloop en de aquifer wordt berekend als volgt:

$$Q = C(H - h) \quad h > z$$

waarbij H het waterpeil is in de rivier of kanaal [L], h de grondwaterstijghoogte in de aquifer [L] en z de bodemhoogte van het stroombed. Indien de grondwaterstand in de aquifer onder de bodem van het stroombed zakt, wordt de stroming onafhankelijk van de grondwaterspiegel:

$$Q = C(H - z) \quad h \leq z$$

Voor een overzicht van de gebruikte invoergegevens wordt verwezen naar Deelopdracht 1, paragraaf 2.8. Bij het inlezen van de riviergegevens in GMS bedroeg de conductantie voor een groot aantal cellen 0. Bij controle bleek dat i.g.v. aanwezigheid van verschillende riviersegmenten in een modelcel, GMS in de RIVER-file meerdere regels voor de zelfde cel aanmaakt, maar dat de waarden niet altijd correct werden weergegeven. Om hieraan te verhelpen, werden de riviergegevens vooraf verwerkt en via een punten-bestand ingelezen in GMS. Voor de verwerking (zie Figuur 3.3) werd voor elke RIVER-CEL (unieke rij, kolom, laag) nagegaan of er 1 of meer riviersegmenten aanwezig waren. In het eerste geval werd de overeenkomstige waarde voor conductantie, bodem- en rivierpeil aan de cel in kwestie toegekend. In het tweede geval werd (a) in geval van een gelijk rivier- en bodempeil de conductantie gesommeerd en vervolgens toegekend aan de cel, en (b) in geval van een verschillend rivier- en bodempeil de verschillende waarden aan de cel toegekend. Het is dus mogelijk dat verschillende rivier- of bodempeilen worden toegekend aan 1 unieke cel (rij, kolom, laag).



Figuur 3.3: Overzicht verwerking en toekenning riviergegevens voor het CKS-model in GMS.

Tijdens de modellering en kalibratie werd eveneens vastgesteld dat de voeding van de kanalen naar het grondwater te hoog wordt ingeschat. In een poging om de werkelijke waarden te benaderen werd de conductantie voor de kanalen met een factor 10 verlaagd (zie paragraaf 5).

3.4.3. DRAINAGE (DRAIN-CONDITIES)

Voor de grondwateruitstroming uit het model, met name in kwelgebieden, kleinere waterlopen en grachten, zijn rivier-randvoorwaarden niet geschikt en wordt veeleer de DRAIN-conditie gebruikt. De werking van de DRAIN-module is vrijwel analoog aan de RIVER-module. Het verschil bestaat erin dat waterinsijpeling van de drain naar de aquifer niet mogelijk is. M.a.w. de drainage duurt voort zolang de stijghoogte in de watervoerende laag hoger is als de ligging van de drain, en stopt als de stijghoogte beneden de drainagehoogte zakt.

De werking van de DRAIN-module wordt beschreven met behulp van de volgende vergelijkingen:

$$Q = C(h - d) \quad \text{voor } h > d$$

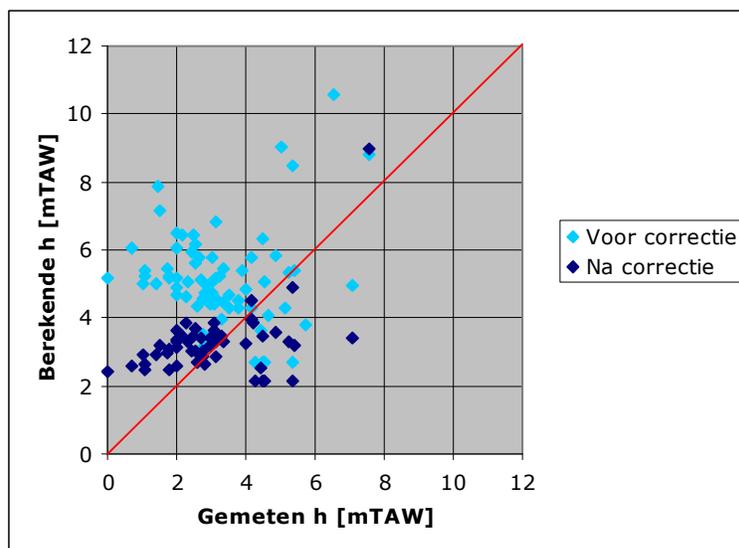
$$Q = 0 \quad \text{voor } h \leq d$$

waarbij Q [L^3/T] de kwel volume flux is naar de drain, h [L] de grondwaterstijghoogte in de aquifer, en d [L] de hoogteligging van de drain. De coëfficiënt C [L^2/T] is een samengestelde conductantie die alle stijghoogteverliezen beschrijft tussen de drain en de regio van de cel in welke de stijghoogte h verondersteld wordt te heersen. Zie ook Deelopdracht 1, paragraaf 2.9, voor meer uitleg over de werking van de DRAIN-module.

Op basis van de beschikbare gegevens met betrekking tot het drainageniveau (zie deelopdracht 1, paragraaf 2.9) werd met behulp van het gebiedsdekkende digitaal

hoogtemodel het DRAIN-niveau per cel berekend. Met uitzondering van cellen met een RIVER-voorwaarde, werd in elke modelcel een DRAIN-voorwaarde opgelegd. Voor zones waarvoor het drainageniveau 'onbekend' was (kunstmatige bodems, militaire domeinen, veengronden, etc.), werd een waarde van 0,05 m onder maaiveld verondersteld. Voor de drainconductantie werd een uniforme waarde van 250 m²/d aangenomen.

Tijdens de modellering werd echter vastgesteld dat de drainagepeilen in stedelijk gebied (met name Antwerpen-stad) verkeerdelijk werden ingeschat, met dus mogelijk een negatief beïnvloeding van de berekende stijghoogten. Op basis van gegevens¹ geleverd door AMINAL werden de drainagepeilen voor Antwerpen-stad aangepast. Dit zorgde lokaal voor een verbetering van de model resultaten, wat blijkt uit een vergelijking van de gemeten en berekende stijghoogten op de 81 observatiepunten (laag 1) binnen een straal van 1,5 km van de gecorrigeerde drainagepeilen. Figuur 3.4 toont de resultaten voor (RMSE: 3,65 m) en na (RMSE: 1,95 m) de correctie van de drainagepeilen in Antwerpen-stad.



Figuur 3.4: Gemeten versus berekende stijghoogten voor (licht) en na (donker) correctie van de drainagepeilen voor Antwerpen-stad.

3.4.4. GRONDWATERWINNINGEN (WELL-CONDITIES)

In totaal bevinden zich 3.155 grondwaterwinningen in het modelgebied, waarvan 3.104 aan Vlaamse zijde en 51 aan Nederlandse zijde. Het betreft winningen in het Quartair Aquifersysteem (0100) of Kempens Aquifersysteem (0200), i.e. boven de Boom Aquitard

¹ Gebaseerd op: 'Stijghoogtekaart van Antwerpen op basis van peilmetingen 1984-2001 en rekening houdend met permanente bemaling', opgesteld door Dieter Vandeveld (Universiteit Gent, jaartal onbekend).

(HCOV 0300) die de ondergrens vormt van het model, met een gemiddeld onttrekkingsdebiet van 155 m³/d (Max.: 23922 m³/d) voor het jaar 2000.

Voor de winningen aan Vlaamse zijde kan een onderscheid gemaakt worden tussen 'vergund' debiet, 'effectief onttrokken' debiet en 'ingeschat onttrokken' debiet. Het betreft winningen uit de vergunningendatabank. Indien gekend werd in de modellering met het effectief onttrokken debiet gerekend, in het andere geval werd gerekend met het ingeschat onttrokken debiet (zie Deelopdracht 1, paragraaf 2.6). De winningen werden toegekend aan de modellaag overeenkomstig de HCOV-eenheid waaruit gewonnen wordt, waarbij verondersteld wordt dat de filterlengte zich over de volledige modellaag uitstrekt.

In Nederland zijn de grondwaterwinningsgegevens afhankelijk van de vergunningsverlenende overheid, met name: winningen vergund door de provincies (28), winningen van de industrie, bronbemalingen en diverse andere winningen (14), en winningen van de drinkwatermaatschappijen (9). In het totaal zijn dus 51 winningen aanwezig in het Nederlands deel van het modelgebied. Voor de modellering werd gebruik gemaakt van het beschikbare opgepompt volume per winning.

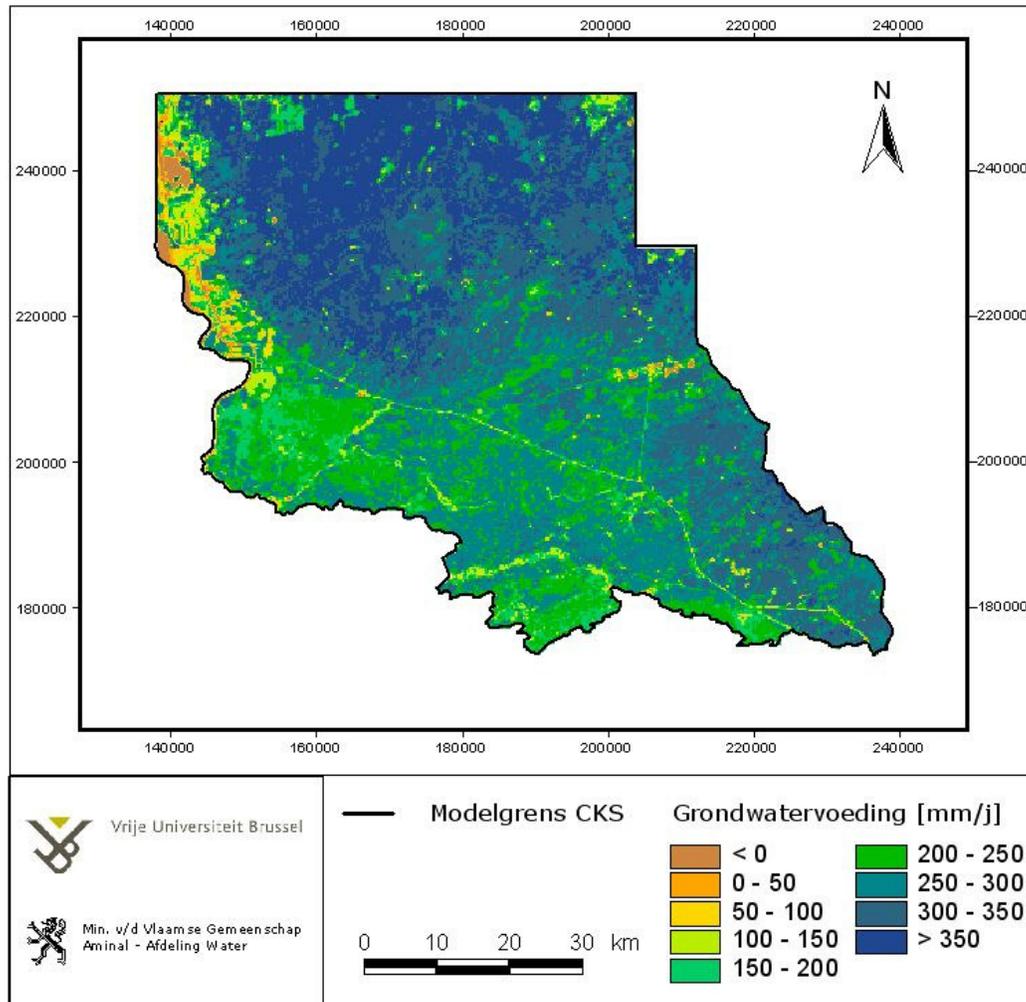
3.4.5. GRONDWATERVOEDING (RECHARGE)

Voor de grondwatervoeding werd beroep gedaan op de resultaten van het Vlaams Grondwatervoedingsmodel (Meyus et al., 2004b). De grondwatervoeding is berekend met WetSpass (Batelaan & De Smedt, 2001). WetSpass is een stationair simulatiemodel voor water- en energietransport in bodem, plant en atmosfeer. Het model berekent de oppervlakkige afvoer, de verdamping (evapotranspiratie) en de grondwatervoeding op basis van het landgebruiktype, de bodemtextuur, de topografische helling en klimatologische gegevens. Het WetSpass-model heeft een flexibele structuur en is volledig als een AVENUE-toepassing geïntegreerd in GIS ArcView (AVENUE is de 'object oriented' programmeertaal van ArcView), waardoor het zeer efficiënt en gebruiksvriendelijk is.

In het Vlaams Grondwatervoedingsmodel van Meyus et al. (2004b) werd de gemiddelde jaarlijkse grondwatervoeding berekend voor een raster met een celresolutie van 50 bij 50 m. Gezien in de huidige grondwatermodellering een celgrootte van 250 bij 250 m gehanteerd wordt, werd dit raster met de grondwatervoedingswaarden omgezet naar de overeenkomstige resolutie. Vermits elke cel 25 originele cellen (50 m x 50 m) bevat, werd de grondwatervoeding berekend door het gemiddelde te maken.

Figuur 3.6 toont de grondwatervoeding in het modelgebied berekend met WetSpass. De gemiddelde grondwatervoeding voor het gehele modelgebied bedraagt 286 mm/j. De grondwatervoeding is opmerkelijk hoger (300 tot 450 mm/j) ten noorden en oosten van het Albertkanaal, terwijl de zone nabij het kanaal eerder een lage grondwatervoeding (ongeveer 200 mm/j) heeft. Ten zuiden van het Albertkanaal varieert de grondwatervoeding tussen de

150 en de 300 mm/j, geleidelijk aan oplopend van west naar oost. De laagste grondwatervoeding (< 150 mm/j) komt overeen met bebouwde zones, o.a. Antwerpen-stad en -haven in het noordwesten, en grote wateroppervlakken zoals in de natte zandwinningen (zanden van Mol) ten oosten van Dessel.



Figuur 3.5: Grondwatervoeding berekend met WetSpass (Meyus et al., 2004b) (grid: 250 x 250 m).

3.5. HYDRAULISCHE PARAMETERS

Voor het toekennen van de hydraulische parameters aan elk van de respectievelijke modellagen werd, in eerste instantie, een constante waarde voor elke modellaag verondersteld, met uitzondering van die locaties waar een modellaag uitwigt (zie ook paragraaf 3.3.2). In Tabel 3.1 wordt een overzicht gegeven van de range van hydraulische doorlatendheden of K-waarden per modellaag. Hiervoor werd een beroep gedaan op de beschikbare regioparameters, zoals geïnventariseerd in Deelopdracht 1 (paragraaf 2.7) van deze studie. Indien beschikbaar werd vertrokken van de gemiddelde totale conductiviteit voor de betreffende HCOV-sub- en basiseenheden binnen een modellaag.

Tabel 3.1: Overzicht van de K-waarden. Voor de benamingen van de HCOV-eenheden wordt verwezen naar Tabel .

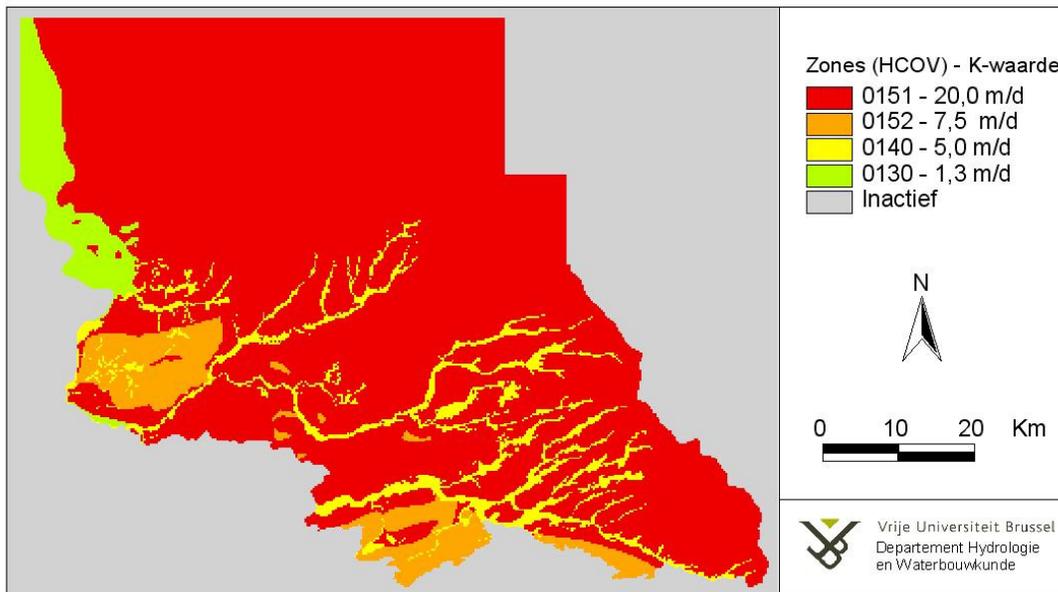
Modellaag	HCOV of K-zone	Omschrijving laag	Gemiddeld [m/d]	Fysische range [m/d]
1	0100	Quartaire Aquifersystemen	4,8	1 – 10
2	0220	Klei-Zand-complex van de Kempen	9,4	5 – 15
3	0230	Pleistoceen en Pliocene Aquifer	20,5	4 – 40
4	0240	Pliocene kleiige laag	0,1	0,04 – 0,2
5	0250	Mioceen Aquifersysteem	14,1	3 – 30

Opmerking: De fysische range heeft betrekking op de maximale range van K-waarden voor de beschouwde HCOV-eenheid, i.e. het bereik tussen de minimum en maximum K-waarde; enkel regiowaarden werden hierbij beschouwd en de waarden werden afgerond.

Zoals vermeld in paragraaf 3.3.2 worden de hydraulische doorlatendheden (K-waarde) enkel ruimtelijk gevarieerd voor de modellagen 1 en 2. Voor de modellagen 3 t.e.m. 5 wordt een constante hydraulische doorlatendheid voor de ganse modellaag verondersteld.

• Modellaag 1

Voor de ruimtelijke variatie van de hydraulische doorlatendheid in modellaag 1 (HCOV 0100) werd een beroep gedaan op de indeling in sub- en basiseenheden van de HCOV kartering. Voor de sub- en basiseenheden 0130, 0140, 0151, 0152 werden zones met een verschillende hydraulische doorlatendheid verondersteld (zie figuur 3.6).



Figuur 3.6: Zones met verschillende hydraulische doorlatendheid voor modellaag1 (HCOV 0100).

Voor het toekennen van de hydraulische doorlatendheid werd gebruik gemaakt van de beschikbare puntwaarden voor de respectievelijke eenheden. Na kalibratie werden volgende waarden voor deze parameters bekomen:

Tabel 3.2: Hydraulische doorlatendheden HCOV 0100.

HCOV-EENHEDEN		Beschrijving	K [m/d]
SUB	BASIS		
0130		Polderafzettingen	1,3
0140		Alluviale deklagen	5,0
0150	0151	Zandige deklagen	20,0
	0152	Zand-lemige deklagen	7,5

- Modellaag 2

Voor modellaag 2 bestaande uit het Zand-Klei complex van de kempen (HCOV 0220) werd eveneens een ruimtelijk verdeelde hydraulische doorlatendheid berekend. Op basis van de isopachen en de respectievelijke hydraulische doorlatendheden van de HCOV basiseenheden 0221, 0222 en 0223 werd per cel een gecombineerde hydraulische doorlatendheid berekend met volgende formule:

$$K_{laag2} = \frac{K_{0221}D_{0211} + K_{0222}D_{0222} + K_{0223}D_{0223}}{D_{0221} + D_{0222} + D_{0223}}$$

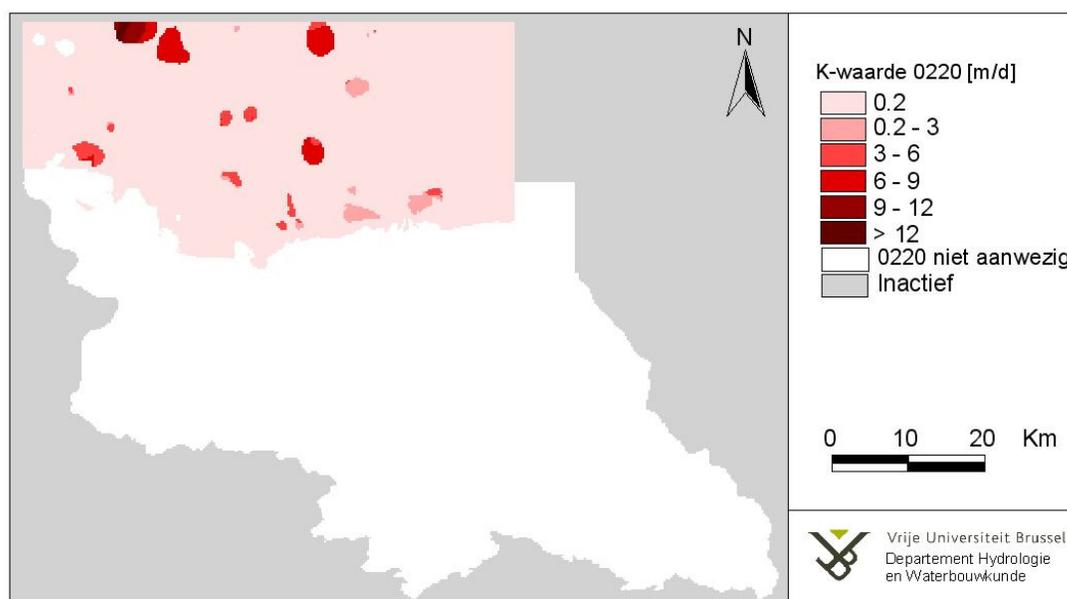
met K de hydraulische conductiviteit [m/d] en D de dikte [m] van elke laag.

Op basis van de beschikbare puntparameters (vnl. metingen in de zandig basiseenheid) en literatuur (Goosens, 1984; Wouters & Vandenberghe, 1994; Wemaere & Marivoet, 1995) werd een schatting gemaakt van de hydraulische conductiviteiten voor de basiseenheden 0221, 0222 en 0223. Waarden werden verondersteld zoals weergegeven in Tabel 3.3.

Tabel 3.3: Hydraulische doorlatendheden HCOV 0220.

HCOV-EENHEDEN		Beschrijving	K [m/d]
SUB	BASIS		
0220	0221	Klei van Turnhout	0,2
	0222	Zand van Beerse	15,0
	0223	Klei van Rijkevorsel	0,2

Figuur 3.7 toont de ruimtelijke verdeling van de berekende, gecombineerde hydraulische conductiviteit voor modellaag 2 (HCOV 0220).



Figuur 3.7: Hydraulische doorlatendheid voor modellaag2 (HCOV 0220).

De respectievelijke K-waarden voor alle modellen werden tijdens de gevoeligheidsanalyse en modelkalibratie over hun fysische range gevarieerd (zie verder, paragraaf 4 en 5).

Opmerking: De verhouding K_h/K_v , weergegeven door de verticale anisotropie factor, wordt constant beschouwd. Deze anisotropie varieert van modellaag tot modellaag. Bij de kalibratie werd de waarde gevarieerd tussen 2 en 20. Uiteindelijk werd een waarde van 5 weerhouden, met uitzondering voor de uitwiggende zones (zie paragraaf 3.3.2).

4. GEVOELIGHEIDSANALYSE

De kalibratie van modellen van vrij complexe systemen wordt dikwijls belemmerd door ongevoelige parameters en extreme correlatie door een gebrek aan beschikbare gegevens. Om deze reden is het erg belangrijk om eerst een gevoeligheidsanalyse uit te voeren alvorens aan de modelkalibratie te beginnen. De parameterwaarden van de hydraulische doorlatendheid, de grondwatervoeding, de grensvoorwaarden, het volume gewonnen grondwater, de drainageweerstand en de rivierconductanties werden hierbij achtereenvolgens over hun fysisch range gevarieerd. De grootte van de verandering in stijghoogte is een maat voor de gevoeligheid van de oplossing t.a.v. de betreffende parameter. De gevoeligheidsanalyse werd uitgevoerd voor elk van bovengenoemde parameters afzonderlijk. Om de grootste range aan mogelijke oplossingen na te gaan, werd daarna ook het gecombineerde effect van de meest gevoelige parameters nagegaan.

GMS laat een automatische gevoeligheidsanalyse toe, waarbij de gevoeligheid t.a.v. een parameter kan nagegaan worden op basis van de 'composite scaled sensitivity' (CSS), berekend als:

$$CSS_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial h_i}{\partial p_j} \right) p_j \omega_i^{1/2} \right]^2}$$

waarbij h_i/p_j de gevoeligheid is van de i^{de} gesimuleerde stijghoogte h t.a.v. de j^{de} parameter p_j , ω_i het gewicht van de i^{de} observatie, en N het aantal sensitiviteitspunten. Voor de berekening van de CSS werden voor laag 1 t.e.m. 5 45 locaties, regelmatig verdeeld over het modelraster, geselecteerd. In totaal werden aldus 225 sensitiviteitspunten beschouwd (zie figuren 4.1 t.e.m. 4.13). Een automatische gevoeligheidsanalyse werd uitgevoerd voor de verschillende K parameters. De gevoeligheid t.a.v. de overige parameters (grondwatervoeding, opgepompt volume, grensvoorwaarden, etc.) kon echter niet nagegaan worden met behulp van deze automatische gevoeligheidsanalyse, aangezien deze parameters ruimtelijk gedistribueerd zijn. Voor deze parameters werd enkel de relatieve gevoeligheid S_r berekend.

Een eenvoudige gevoeligheidsanalyse kan als volgt uitgevoerd worden. Indien de beschouwde parameter P met een kleine waarde ΔP gevarieerd wordt, zal dit leiden tot een kleine verandering Δh in de berekende stijghoogte h . De relatieve gevoeligheid S_r kan dan als volgt berekend worden:

$$S_r = \frac{\Delta h/h}{\Delta p/p}$$

M.a.w., de relatieve gevoeligheid S_r is de verhouding van het relatief verschil in berekende stijghoogte en in parameterwaarde. Een lage gevoeligheid geeft aan dat de onzekerheid in de waarde van de betreffende parameter weinig doorweegt op de modelresultaten. Indien $S_r > 1$ vergroot de onzekerheid en kunnen grote fouten optreden in de modelresultaten. Door onderlinge vergelijking van de berekende gevoeligheden kunnen de meest kritische parameters geïdentificeerd worden. De berekening van S_r is gebaseerd op dezelfde 225 sensitiviteitspunten als voor de berekening van de CSS.

Het effect op de ruimtelijke verdeling van de afwijkingen kan weergegeven worden onder de vorm van gevoeligheidskaarten, cfr. figuren 4.1-4.13. Op basis hiervan kan afgeleid worden welke zones het meest gevoelig zijn voor veranderingen in een specifieke parameter. De rode kleurklassen wijzen op een lagere stijghoogte h_s voor het respectievelijke modelscenario in vergelijking met de referentiesituatie $h_{\text{referentie}}$, de groene kleurklassen duiden op een hogere stijghoogte h_s t.o.v. de referentiesituatie $h_{\text{referentie}}$. Als "referentie" werden de modelresultaten genomen bekomen met de gemiddelde totale doorlatendheden, zoals gegeven in Tabel 3.1. Het betreft een convergerend model met een fout van quasi 0% op de waterbalans.

4.1. HYDRAULISCHE DOORLATENDHEID

Een automatische gevoeligheidsanalyse in GMS werd uitgevoerd, waarbij de gevoeligheid t.a.v. de verschillende horizontale K parameters werd nagegaan op basis van de 'composite scaled sensitivities'. Tabel 4.1 geeft een overzicht van de K-parameterzones gerangschikt volgens gevoeligheid.

Tabel 4.1: K-parameters gerangschikt volgens gevoeligheid op basis van de 'composite scaled sensitivity' CSS; ranking: 1 = meest gevoelig, 5 = minst gevoelig.

Ranking	K-parameter	Composite scaled sensitivity CSS [-]
1	HK_5 - HCOV 0250	4,92
2	HK_3 - HCOV 0230	0,75
3	HK_1 - HCOV 0100	0,43
4	HK_2 - HCOV 0220	0,20
5	HK_4 - HCOV 0240	0,09

Uit Tabel 4.1 blijkt dat parameter HK_5 voor HCOV 0250 het meest gevoelig is. Gevolgd door, hoewel beduidend minder, de parameters HK_3 en HK_1, voor respectievelijk de HCOV

eenheden 0230 en 0100. Zoals verwacht zijn de modelresultaten weinig gevoelig t.a.v. K in de kleiige laag HCOV 0240 (HK_4).

De onderlinge gevoeligheid van de vijf modellen t.a.v. van K werd berekend op basis van de relatieve gevoeligheid S_r . Als "referentie" voor K werd vertrokken van de gemiddelde waarde voor de respectievelijke K parameter (cfr. Tabel 3.1), die dan binnen zijn fysische range gevarieerd werd, met name de opgegeven minimum en maximum waarde. De relatieve gevoeligheid S_r werd per laag bepaald op basis van 45 sensitiviteitspunten in deze laag (cfr. Tabel 4.2), waarna eveneens voor elke hydraulische parameter een totale gevoeligheid op basis van 225 locaties bepaald werd, waarbij de relatieve verandering in alle lagen in rekening werd gebracht (cfr. Tabel 4.3).

Tabel 4.2: Relatieve gevoeligheid S_r van de hydraulische parameters (HK) per modellaag.

Modellaag	Relatieve gevoeligheid S_r [-]				
	HK_1	HK_2	HK_3	HK_4	HK_5
1	0.17	0.34	1.17	0.19	3.52
2	0.18	0.35	1.26	0.20	3.60
3	0.16	0.34	1.25	0.21	3.69
4	0.16	0.33	1.21	0.14	4.40
5	0.16	0.29	1.09	0.18	5.13
TOTAAL	0.17	0.33	1.19	0.18	4.12

Tabel 4.3: Rangschikking van de hydraulische parameters (HK) op basis van de totale relatieve gevoeligheid S_r ; ranking: 1 = meest gevoelig, 5 = minst gevoelig.

Ranking	Modellaag	Relatieve gevoeligheid S_r [-]
1	HK_5	4,12
2	HK_3	1,19
3	HK_2	0,33
4	HK_4	0,18
5	HK_1	0,17

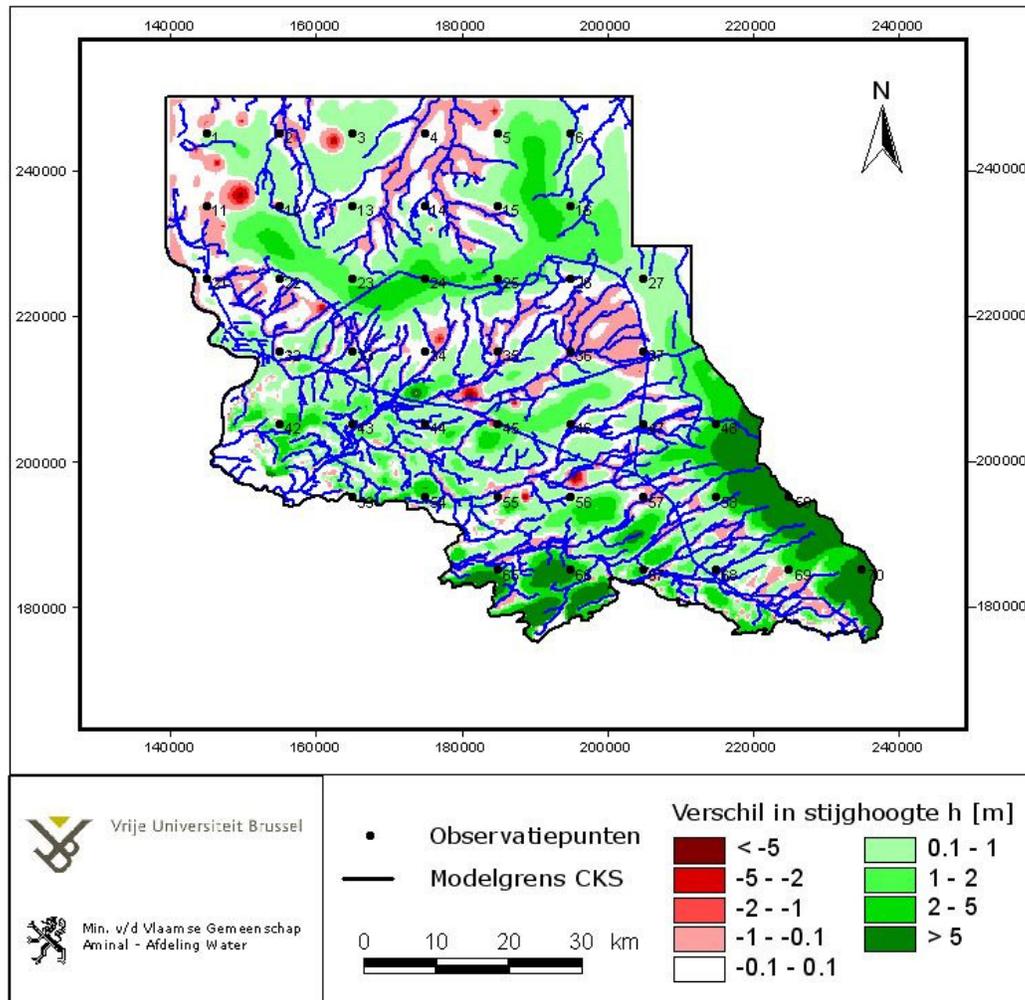
Uit de analyse van de relatieve gevoeligheden van de verschillende hydraulische parameters komen alweer HK_5, de K-waarde van HCOV 0250, en in mindere mate HK_3, de K-waarde van HCOV 0230, naar voren als gevoeligste parameters ($S_r > 1$). De hydraulische parameters (K) voor modellaag 1, 2 en 4 daarentegen blijken weinig gevoelig te zijn. Indien we de gevoeligheid per modellaag bekijken (cfr. Tabel 4.2), blijkt deze meestal het hoogst in

de modellaag waarvoor de parameter aangepast werd. Voor modellaag 5 (HCOV 0250) loopt de S_r bijvoorbeeld op tot 5,13. Het effect van een wijziging van de K-waarde van één modellaag op de gevoeligheid in andere modellagen is dus meestal minder, behalve voor HK_4, wat verklaard wordt door het feit dat het een kleiige laag betreft.

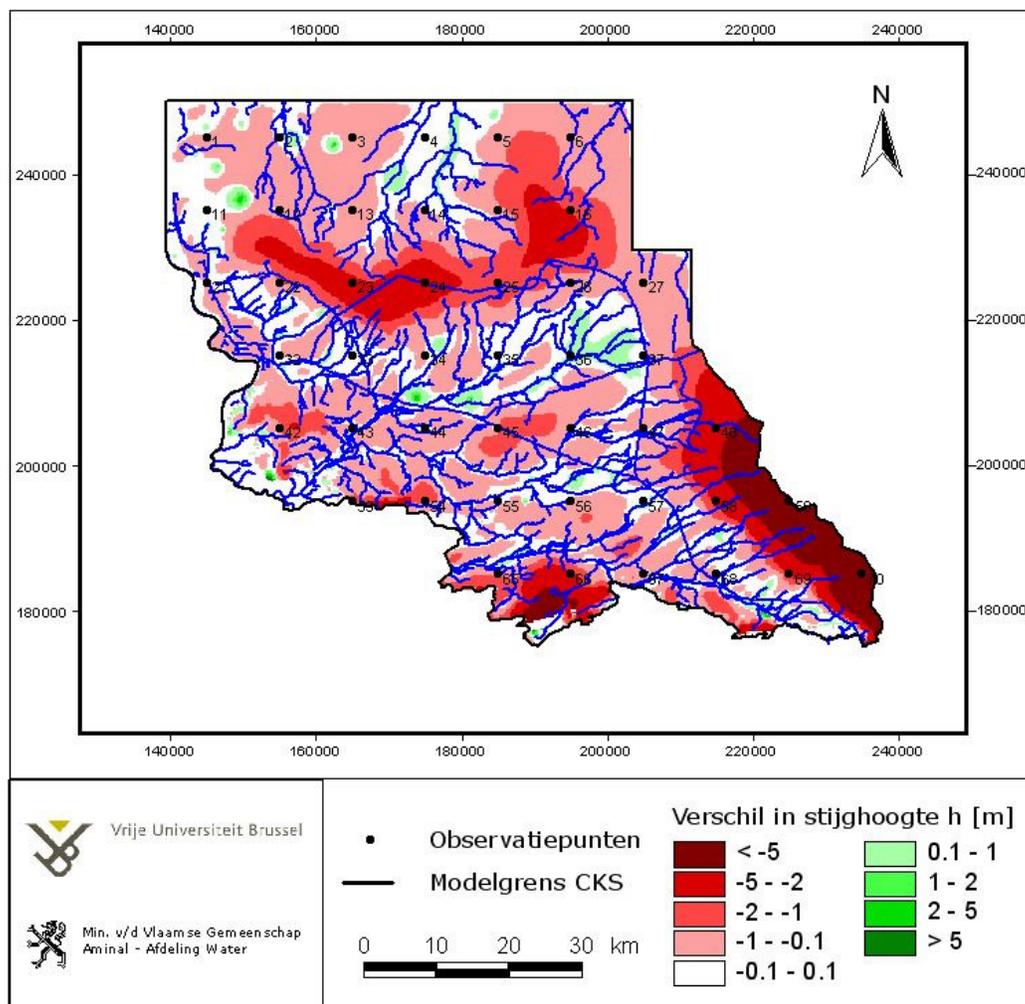
In Figuur 4.1 en Figuur 4.2 wordt het verschil in stijghoogte ten gevolge van een verandering van de hydraulische doorlatendheid van modellaag 5 (HCOV 0250) weergegeven. De grootste verschillen doen zich voor in het zuidoosten, met een gemiddeld² verschil van +1,09 m en -0,84 m voor respectievelijk de minimum en maximum K-waarde. Lagere doorlatendheden voor laag 5 hebben dus over het algemeen een verhoging van de stijghoogten als gevolg, en omgekeerd. Deze grote verschillen verklaren de hoge S_r -waarde, namelijk 5,13 voor modellaag 5. Idem voor Figuur 4.3 en Figuur 4.4, weliswaar voor een verandering van de K-waarde van modellaag 3 (HCOV 0230). De stijghoogteverschillen t.o.v. de referentiesituatie zijn merkkelijk kleiner, respectievelijk gemiddeld² +0,67 m en -0,50 m voor de minimum en maximum K-waarde. De verschillen situeren zich voornamelijk in de noordelijke helft van het modelgebied.

In Figuur 4.5 wordt bij wijze van voorbeeld ook de stijghoogteverschillen ten gevolge van een weinig gevoelige hydraulische parameter gegeven, met name: de K-waarde van modellaag 1 ($S_r = 0.17$). Het gemiddeld² verschil bedraagt amper +0,06 m en -0,02 m en loopt maximaal op tot enkele tientallen cm in geval van respectievelijk een minimale en maximale K-waarde. Opmerkelijk is dat de hoogste verschillen geconcentreerd liggen ter hoogte van de zuidelijke modelgrens. De opeenvolging van de uitwiggende HCOV eenheden, in het model opgenomen als zeer dunne lagen met hoge verticale doorlatendheden, maakt het model in deze zone gevoeliger voor wijzigingen inzake hydraulische doorlatendheid.

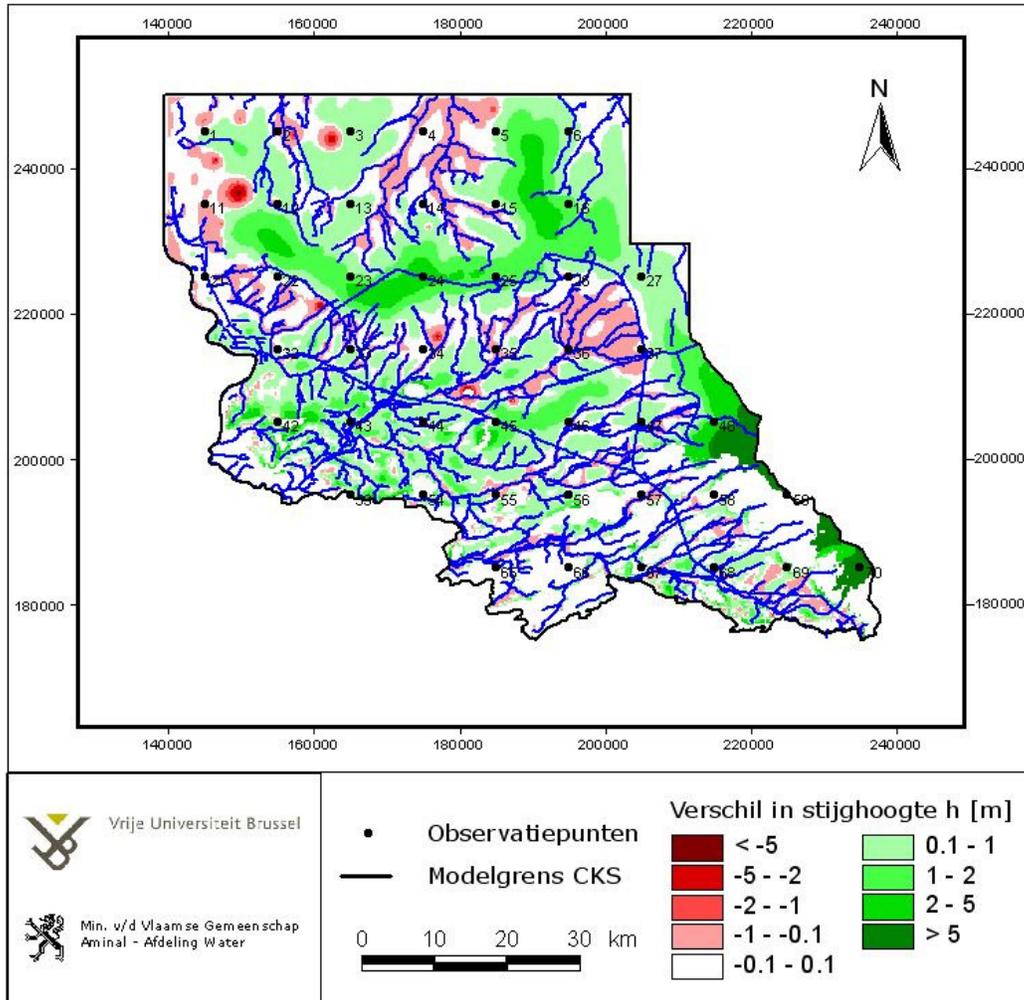
² Onder deze 'gemiddelde waarde' wordt steeds (idem voor volgende paragrafen) het rekenkundig gemiddelde van de stijghoogteveranderingen van alle cellen in een bepaalde laag verstaan. Dus zowel negatieve als positieve verschillen worden in rekening gebracht.



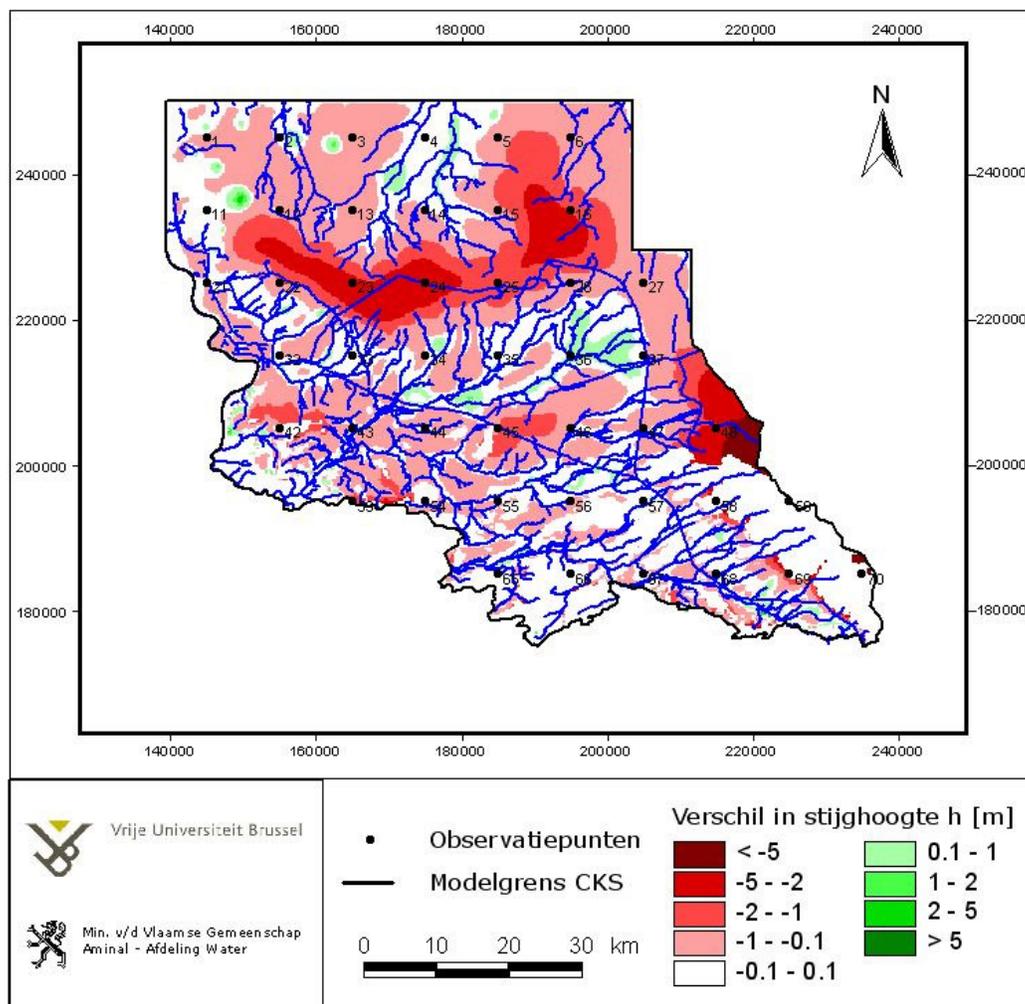
Figuur 4.1: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor K_{min} .
 $HCOV\ 0250$ (i.e. $3\ m/d$): h_s minus $h_{referentie}$.



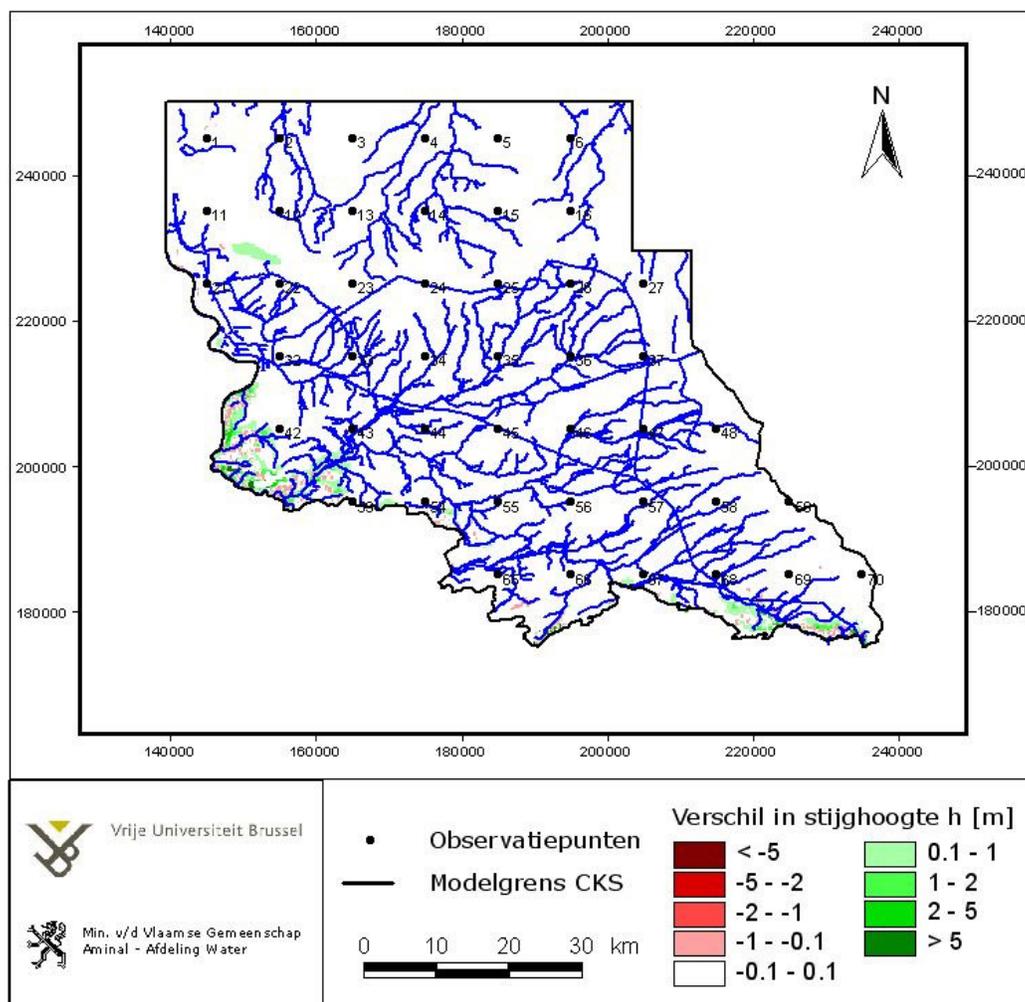
Figuur 4.2: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor K_{max} .
HCOV 0250 (i.e. 30 m/d): h_s minus $h_{referentie}$.



Figuur 4.3: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor K_{min} .
HCOV 0230 (i.e. 4 m/d): h_s minus $h_{referentie}$.



Figuur 4.4: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor K_{max} .
HCOV 0230 (i.e. 40 m/d): h_s minus $h_{referentie}$.



Figuur 4.5: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor K_{max} .
HCOV 0100 (i.e. 1 m/d): h_s minus $h_{referentie}$.

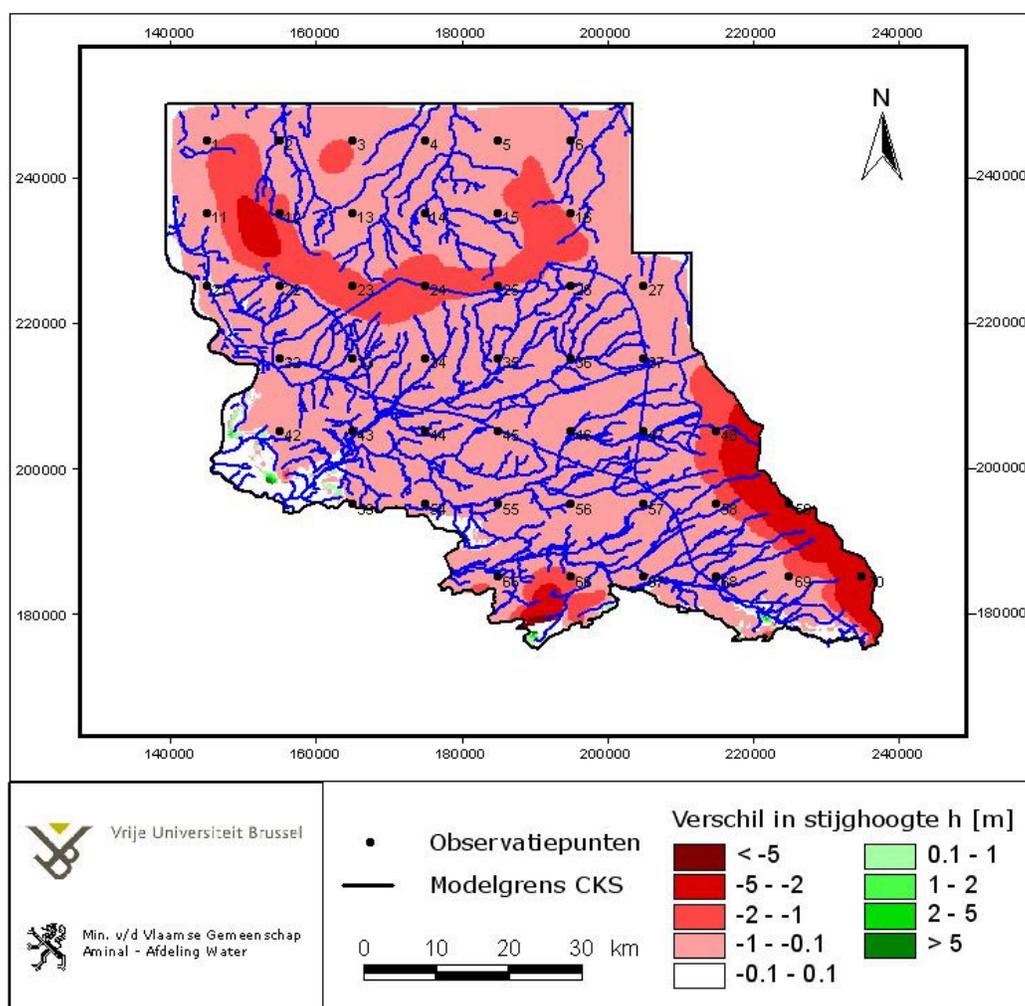
4.2. GRONDWATERVOEDING

Om de gevoeligheid van de grondwatervoeding na te gaan, werden twee simulaties uitgevoerd waarbij de referentie grondwatervoeding (berekend met WetSpaSS, zie deelrapport 1) respectievelijk met 25% verhoogd en met 25% verlaagd werd.

Indien de grondwatervoeding met 25% gewijzigd wordt, bedraagt de gemiddelde verandering in stijghoogte in modellaag 5 respectievelijk +0,45 m en -0,54 m voor een verhoging en een verlaging. Figuur 4.6 geeft de verandering in stijghoogte in modellaag 5 ten gevolge van een verlaging van de grondwatervoeding weer. De grootste verschillen doen zich voornamelijk voor nabij de oostelijke modelrand, waar de verschillen lokaal tot bijna 4 m oplopen, en in mindere mate ook in het noordwesten, ter hoogte van de sensitiviteitspunten 11, 12, 22, 23 en 24 (Figuur 4.6). Dit is niet toevallig op de waterscheidingen, waar het grondwater vaak dieper onder het oppervlak zit en er dus ruimte is voor aanzienlijke stijghoogteveranderingen ten gevolge van een wijziging van de grondwatervoeding.

De totale³ relatieve gevoeligheid S_r van de modelresultaten t.a.v. de grondwatervoeding bedraagt 3,40, wat duidt op een significante gevoeligheid.

³ totale: dit betreft steeds het gemiddelde voor verhoging én verlaging samen.



Figuur 4.6: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor een afname van de grondwatervoeding met 25%: h_s minus $h_{referentie}$.

4.3. RANDVOORWAARDEN AAN DE RAND VAN HET MODELGEBIED

De vaste stijghoogte randvoorwaarden, in het noorden van het modelgebied, werden achtereenvolgens met 1 m verhoogd en verlaagd. Indien gerekend wordt met een verandering van 2 m in stijghoogte wordt het model instabiel en worden grote fouten in de waterbalans verkregen.

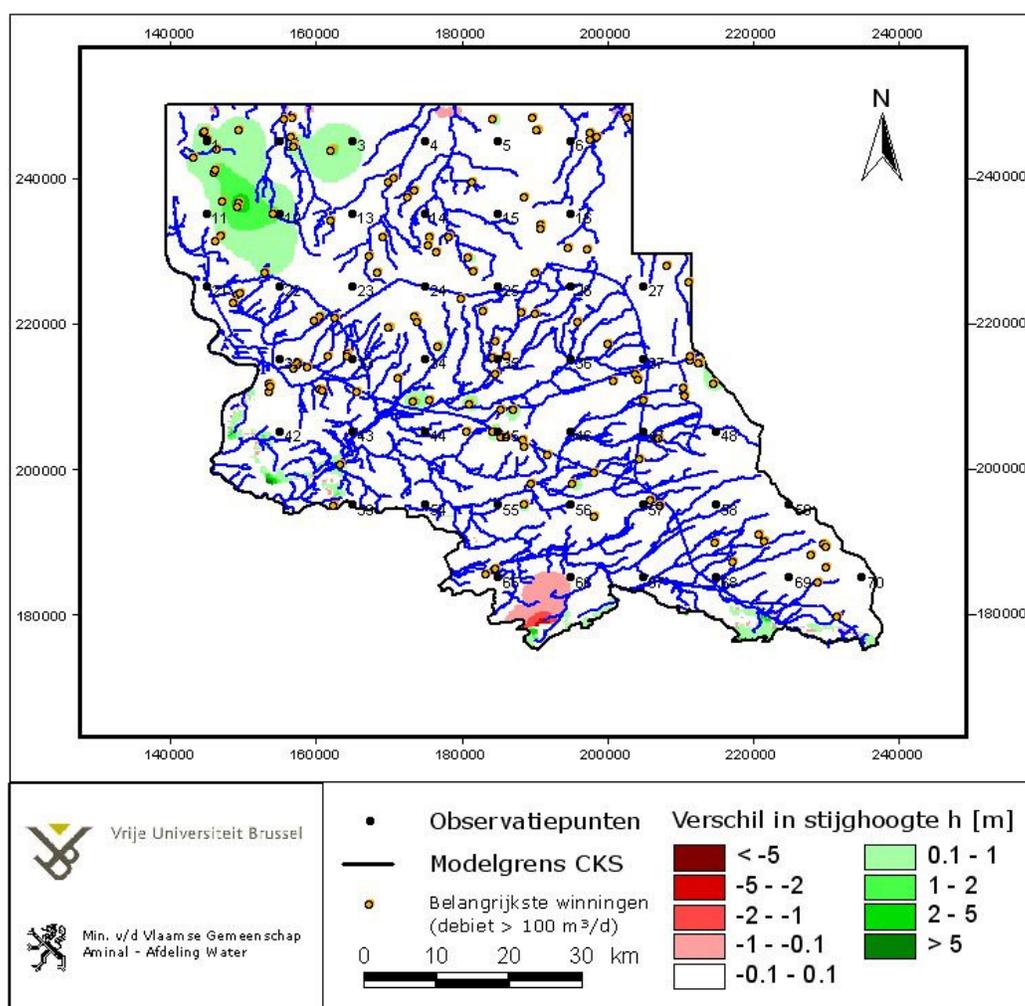
De invloed uit zich vooral in de onmiddellijke omgeving van de modelrand, en over een afstand van maximum 5 km van de rand is nog nauwelijks een effect op de stijghoogte waarneembaar (verandering in stijghoogte < 0,10 m). De gemiddelde stijghoogteverandering voor het gehele modelgebied bedraagt voor zowel een verhoging als een verlaging van de vaste stijgtheogte op de rand om en bij de 0,08 m.

De totale³ relatieve gevoeligheid S_r van de modelresultaten t.a.v. de vaste stijghoogte randvoorwaarden is laag, met name 0,41. Deze parameter speelt, zoals verwacht, eerder een lokale rol.

4.4. GRONDWATERWINNINGEN

De impact van een verandering in opgepompt volume op de stijghoogte manifesteert zich logischerwijze voornamelijk in de omgeving van de drinkwaterwinningen (Figuur 4.7). In de onmiddellijke omgeving van de drinkwaterwinningen in het noordwesten van het modelgebied (ter hoogte van de sensitiviteitspunten 11 en 12) leidt een verandering van 25% in het opgepompt volume tot veranderingen in stijghoogte van ca. 2,5 m. Over een afstand van max. 5 km van de winningen is de invloed nog nauwelijks merkbaar (verandering in stijghoogte < 0,10 m), en de gemiddelde verandering in stijghoogte over het hele modelgebied bedraagt slechts 0,08 m, zowel voor een verhoging als voor een verlaging van het debiet. Verschillende pompingen in elkaars nabijheid hebben vanzelfsprekend een cumulatief effect. De zone met een stijghoogtedaling t.o.v. de referentiesituatie (rood) komt zowel voor in het geval van een verlaging als een verhoging van de debieten. Dit verschil is mogelijk een gevolg van een moeilijke convergentie van het model in het uiterste zuiden met een reeks uitwiggende lagen.

De totale³ relatieve gevoeligheid S_r van de modelresultaten t.a.v. de verandering in opgepompt volume bedraagt ca. 1,11. De relatieve gevoeligheid blijkt iets hoger voor een verlaging (1.31) dan voor een verhoging (0.92) van het pompingsdebiet.



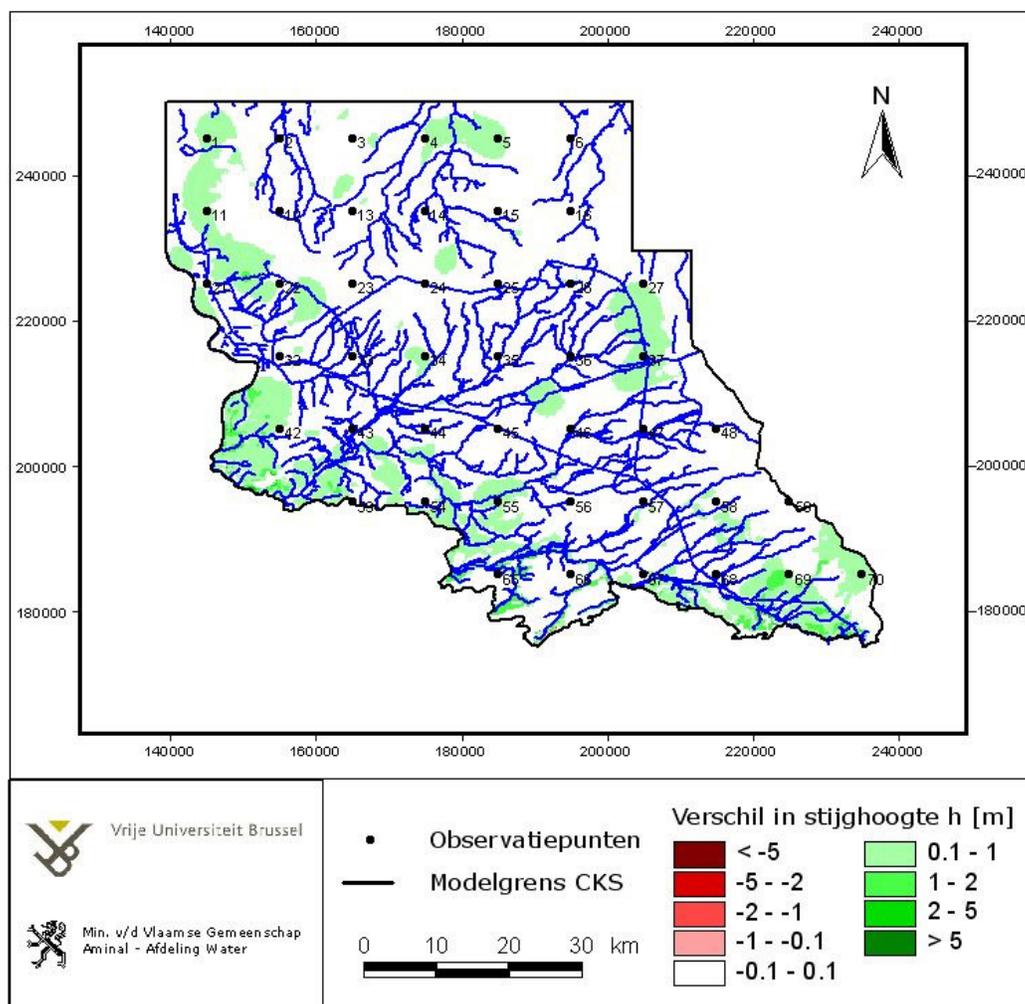
Figuur 4.7: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie bij een verlaging van de pompingsdebieten in de winningen met 25%: h_s minus $h_{referentie}$.

4.5. DRAINAGE

Om de gevoeligheid van de parameter drainconductantie na te gaan, werden twee simulaties uitgevoerd waarbij de referentie conductantie ($250 \text{ m}^2/\text{d}$) voor drains respectievelijk met met een factor 5 verhoogd ($1250 \text{ m}^2/\text{d}$) en met een factor 5 ($50 \text{ m}^2/\text{d}$) verlaagd werd.

Een analyse van de veranderingen in stijghoogte ten gevolge van deze gewijzigde conductantie voor de drains, toont dat de verschillen eerder beperkt blijven. De gemiddelde stijghoogteverandering voor het gehele modelgebied in modellaag 1 bedraagt $-0,12 \text{ m}$ en $+0,20 \text{ m}$ voor respectievelijk een verhoging en een verlaging. Deze verandering loopt op tot een halve meter, heel lokaal zelfs een meter. De invloed is voornamelijk beperkt ter hoogte van een waterscheiding, zoals o.a. op het Kempisch Plateau in het zuidoosten of noordelijker ter hoogte van de observatiepunten 23, 24 en 25. De reden hiervoor is de diepere stand van het grondwater op deze locaties. Figuur 4.8 toont de verandering t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 5 verlaging van de conductantie van de drains.

De totale³ relatieve gevoeligheid S_r van de modelresultaten t.a.v. de conductantie bedraagt ca. 1,32, wat duidt op een beperkte gevoeligheid.



Figuur 4.8: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 5 verlaging in drainconductantie: h_s minus $h_{referentie}$.

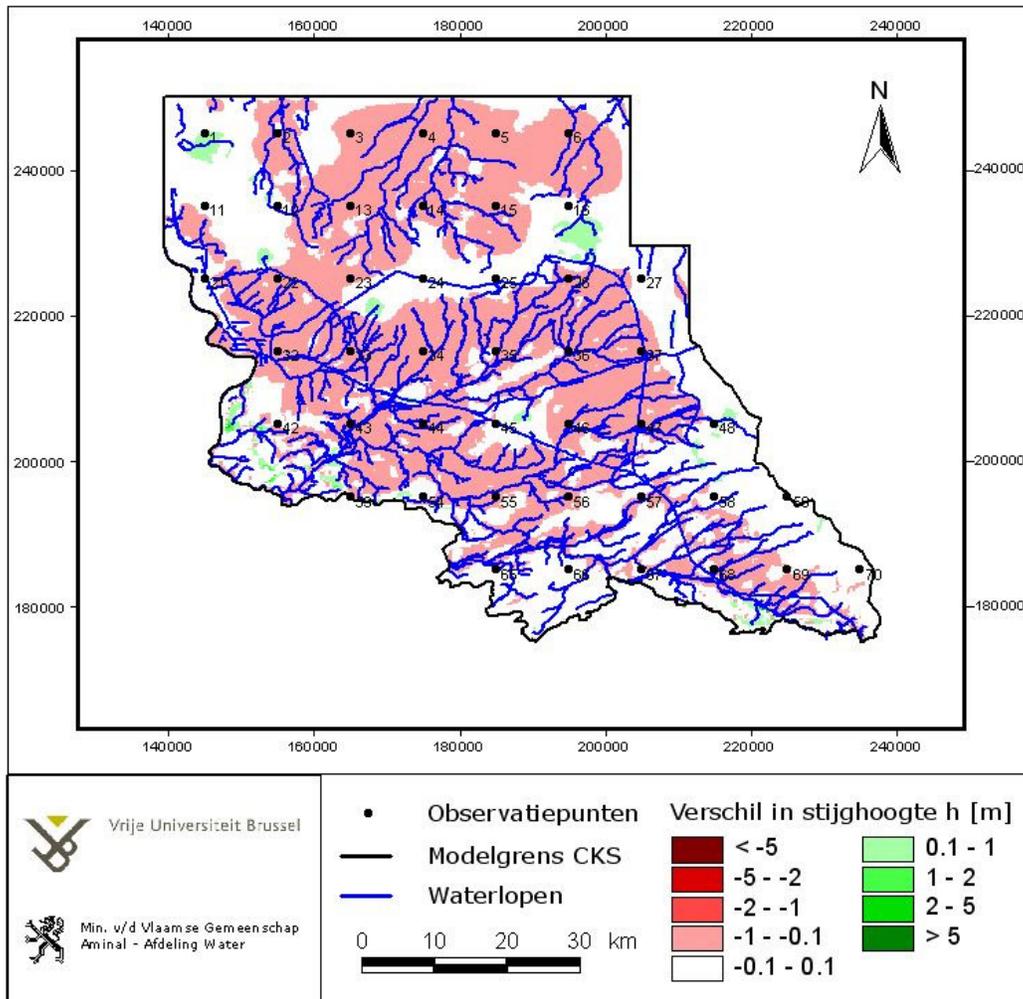
4.6. WATERLOPEN

Om de impact van de bodemconductanties van de rivieren en kanalen op de modelresultaten te onderzoeken werden de conductanties met een factor 2 gevarieerd.

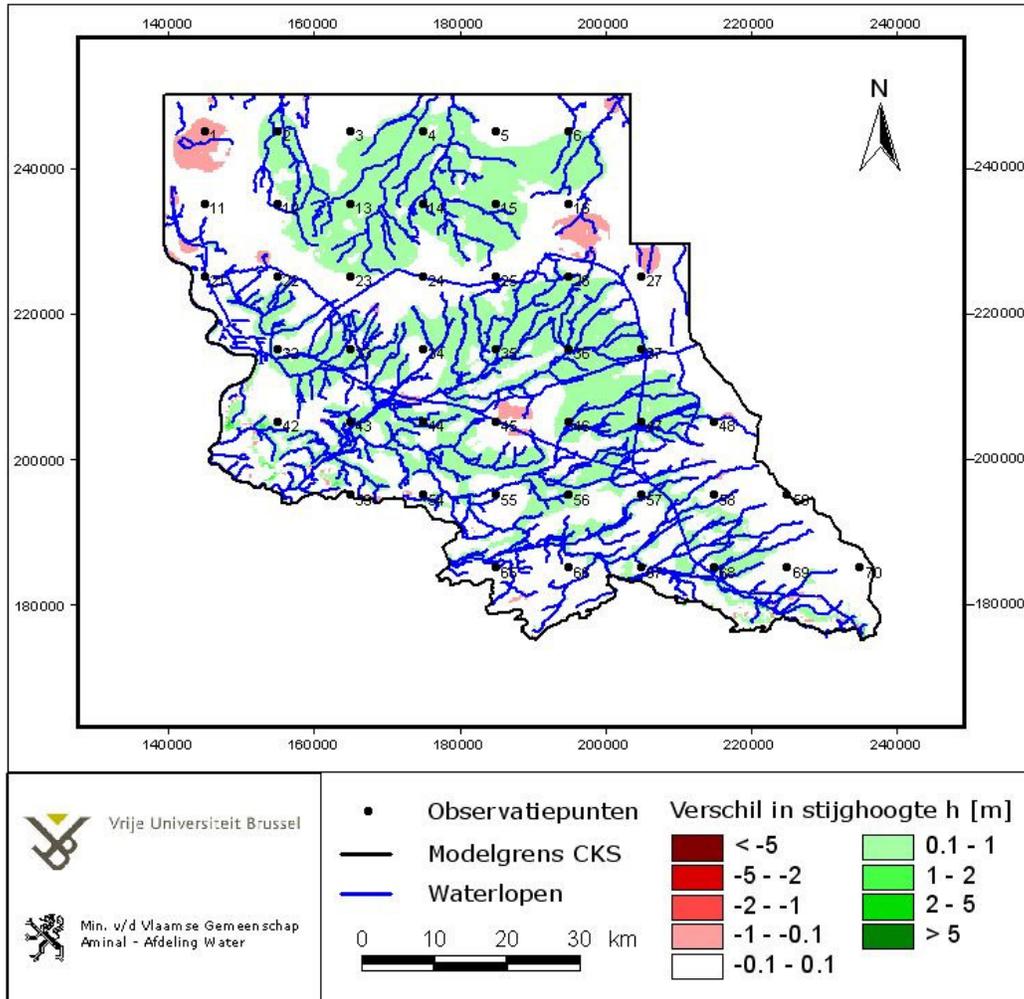
Indien de bodemconductanties van de waterlopen in het model verdubbeld worden, nemen de stijghoogten over het algemeen af. Figuur 4.9 toont de verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 2 toename in conductantie. Voornamelijk in het centrale en noordelijke deel van het modelgebied treden veranderingen op, die meestal oplopen tot ongeveer een halve meter. Aan de randen van het modelgebied treden lokaal stijghoogteverhogingen op. De gemiddelde verandering in stijghoogte bedraagt -0,16 m.

In het geval van een halvering van de bodemconductanties van de waterlopen in het modelgebied doet zich het omgekeerde voor. Met name, in een groot deel van het modelgebied liggen de stijghoogten hoger dan voor de referentiesituatie. De gemiddelde verandering is groter, met name +0,27 m, maar vaak lopen de verschillen op tot een halve meter en lokaal (ter hoogte van sensitiviteitspunt 15) zelfs tot iets meer dan een meter. Figuur 4.10 toont de verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een halvering van de bodemconductantie voor de waterlopen.

De totale³ relatieve gevoeligheid S_r van de modelresultaten t.a.v. de bodemconductanties van de waterlopen bedraagt 3,05, wat duidt op een significante gevoeligheid.



Figuur 4.9: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een verdubbeling van de rivierconductanties: h_s minus $h_{referentie}$.



Figuur 4.10: Verandering in stijghoogte in modellaag 1 t.o.v. de referentiesituatie voor een halvering van de rivierconductanties: h_s minus $h_{referentie}$.

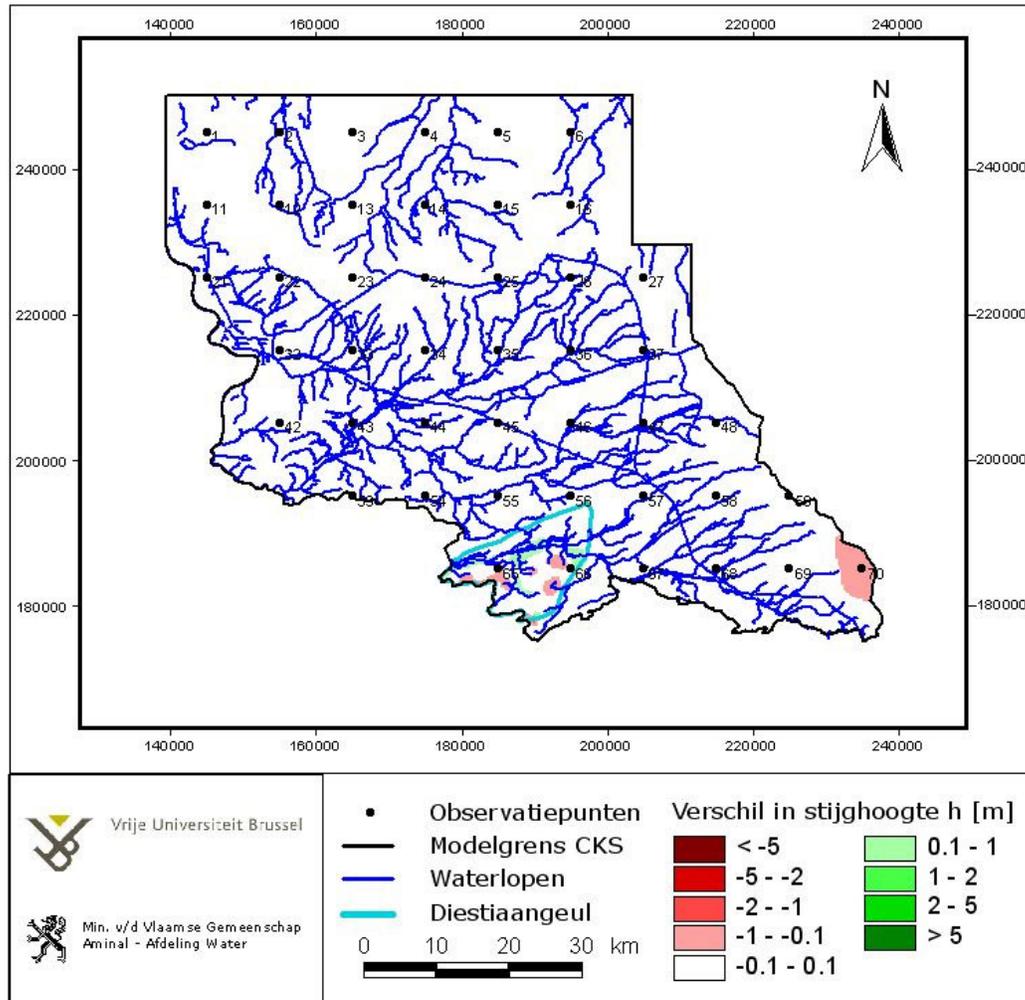
4.7. STROMINGSRANDVOORWAARDE DIESTIAANGEUL

Ter hoogte van de Diestiaangeul – hydraulisch contact tussen Centraal Kempisch Systeem en Brulandkrijtsysteem - werd een stromings-randvoorwaarde gedefinieerd (zie paragraaf 3.4.1). Om de gevoeligheid van deze parameter na te gaan, werden twee simulaties uitgevoerd waarbij de referentie conductantie respectievelijk verdubbeld en gehalveerd werd.

Figuur 4.11 toont de verandering in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor een halvering van de conductantie voor de stromingsrandvoorwaarde. Een analyse van de veranderingen in stijghoogte ten gevolge van deze gewijzigde conductantie, toont dat de verschillen beperkt zijn. Enkel de zone ter hoogte van de Diestiaangeul ondervindt enige invloed en daar loopt het verschil lokaal op tot 0,10 m.

De rode vlek ter hoogte van de grens met het Maasmodel (observatiepunt 70), valt moeilijk te verklaren. Deze daling komt voor in beide scenario's voor de verandering van de conductantie van de stromingsvoorwaarde. Mogelijk ligt de oorzaak bij een moeilijke convergentie in deze zone.

De totale³ relatieve gevoeligheid S_r van de modelresultaten t.a.v. de conductantie voor deze stromingsrandvoorwaarde bedraagt ca. 0,02, wat duidt op een zeer lage gevoeligheid.



Figuur 4.11: Verandering in stijghoogte in modellaag 5 t.o.v. de referentiesituatie voor een halvering van de stromingsrandvoorwaardeconductantie: h_s minus $h_{referentie}$.

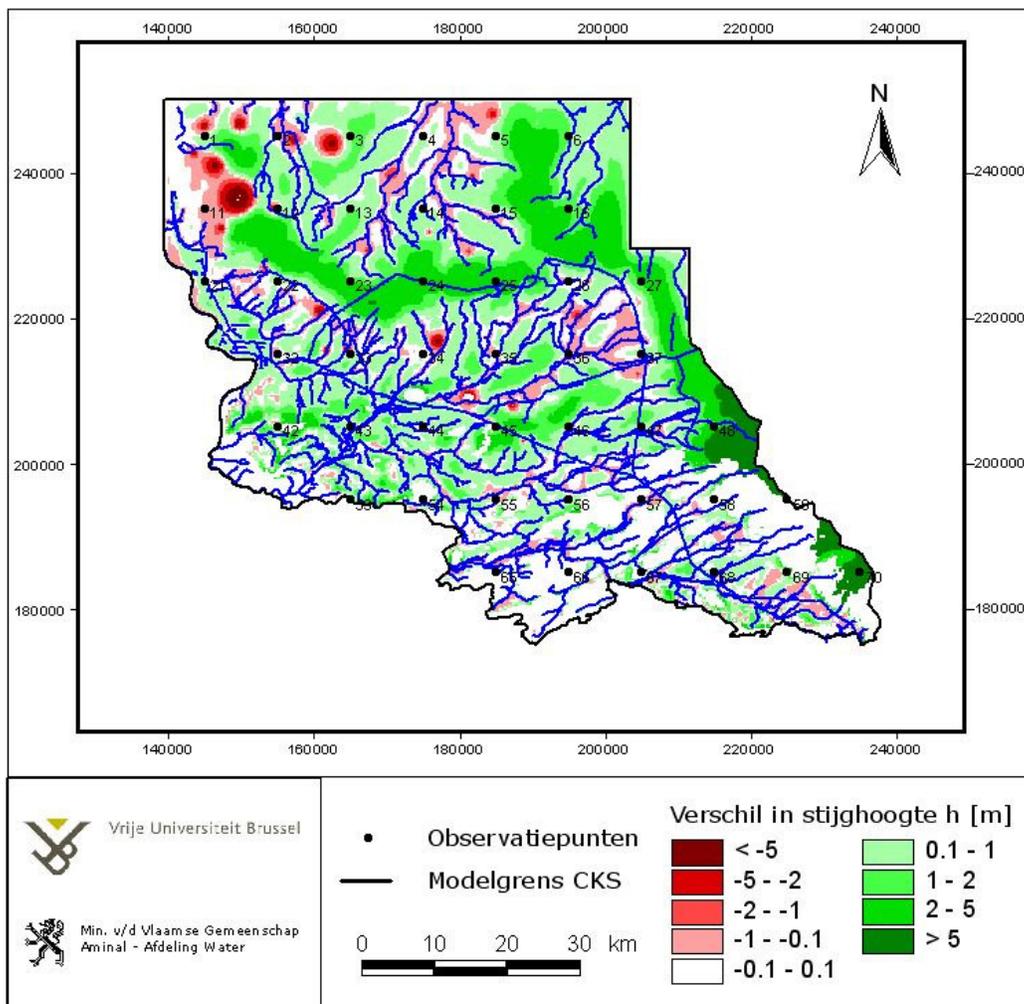
4.8. GECOMBINEERD EFFECT

Vooralsnog werd steeds elke parameter afzonderlijk gevarieerd tijdens de gevoeligheidsanalyse. Echter, het kan ook nuttig zijn om twee of meerdere parameters tegelijkertijd te variëren om op die manier de grootste range van mogelijke oplossingen te verkrijgen. Zo werd het gecombineerde effect van een aantal parameters met een hogere S_r nagegaan, met name: de doorlatendheid van de modellagen 5 en 3 en de grondwatervoeding.

Eerst werd voor de hydraulische doorlatendheden van de modellagen 5 (HCOV 0250) en 3 (HCOV 0230) de minimum waarde (respectievelijk 3 m/d en 4 m/d) en vervolgens de maximum waarde (respectievelijk 30 m/d en 40 m/d) verondersteld om het gecombineerd effect te analyseren. Uit de afzonderlijke analyse van een verandering van beide hydraulische doorlatendheden bleek reeds dat deze eenzelfde effect hebben, met name een toename van de stijghoogten bij een verlaging van de doorlatendheid en omgekeerd (zie paragraaf 4.1). Zoals verwacht zorgt een gecombineerde verandering voor een versterking van deze trend en dus een grotere verandering in stijghoogte, zoals blijkt uit Tabel 4.4. In Figuur 4.12 wordt het stijghoogteverschil in modellaag 3 voor het gecombineerd minimum scenario gegeven, met een gemiddelde verandering van +0.90 m over het gehele modelgebied (zie tabel 4.4). Voor modellaag 5 bedraagt deze verandering +1,29 m.

Tabel 4.4: Stijghoogteverschil ten gevolge van een verandering van de hydraulische doorlatendheden (HK) van modellagen 5 en 3; afzonderlijk en gecombineerd.

Verandering hydraulische doorlatendheid (K)	Param	Enkel K5		Enkel K3		Combinatie	
	K5	MIN	MAX	REF	REF	MIN	MAX
	K3	REF	REF	MIN	MAX	MIN	MAX
Stijghoogteverschil [m] laag 5		+1.09	-0.84	+0.18	-0.14	+1.29	-0.96
Stijghoogteverschil [m] laag 3		+0.67	-0.50	+0.20	-0.16	+0.90	-0.61

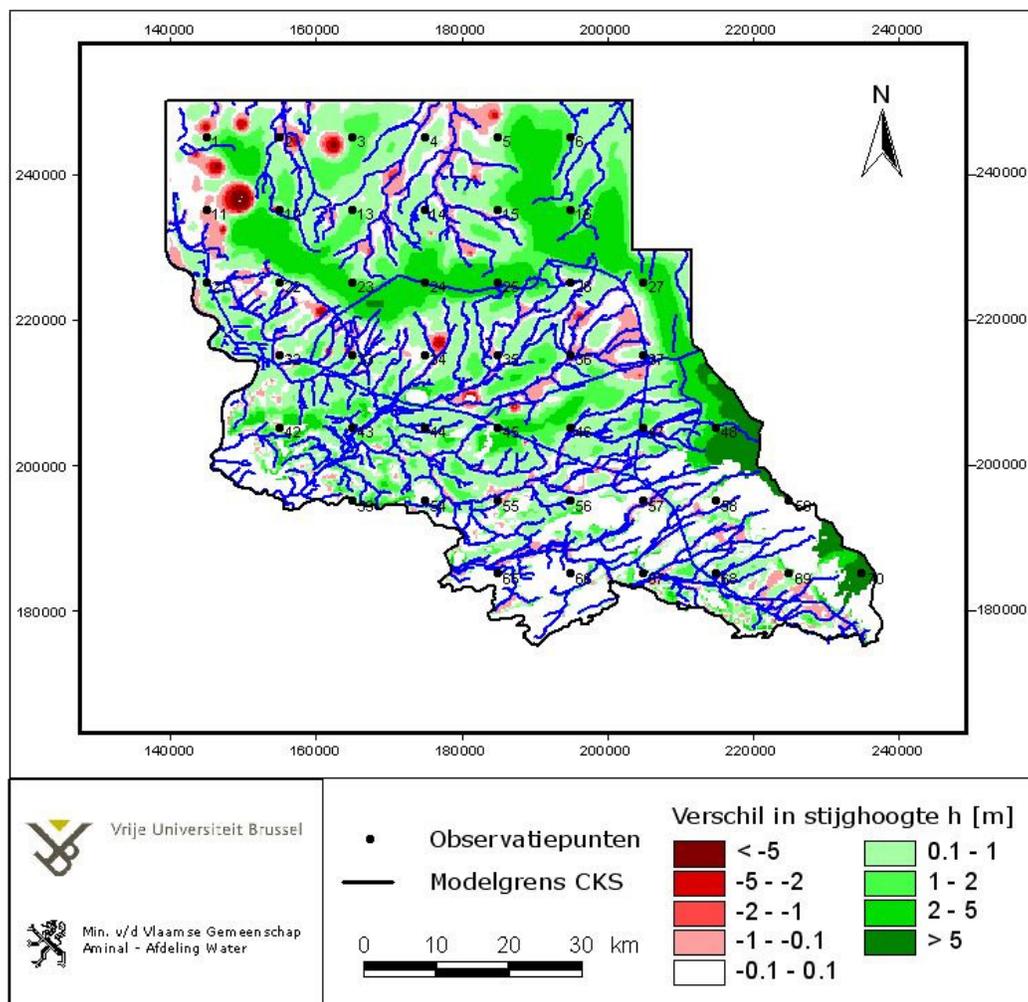


Figuur 4.12: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor een combinatie van $HK_5 = 3 \text{ m/d}$ en $HK_3 = 4 \text{ m/d}$: h_s minus $h_{\text{referentie}}$.

Vervolgens werd ook het effect van een combinatie van een verandering in hydraulische conductiviteiten en een verandering in grondwatervoeding nagegaan. Om de maximale range van de stijghoogten onder invloed van de verscheidene parameterwaarden na te gaan, werd verhoging van de grondwatervoeding gecombineerd met minimale doorlatendheden, en omgekeerd. Er werd echter slechts een verandering van 10% verondersteld (i.p.v. 25% in het afzonderlijke scenario; zie paragraaf 4.2), vermits dit een realistischere waarde is. Komt ongeveer overeen met de grondwatervoeding tijdens de winter of de zomer. In Figuur 4.13 wordt het stijghoogteverschil in modellaag 3 voor dit gecombineerd scenario gegeven. De gemiddelde stijghoogteverandering voor het gehele modelgebied bedraagt +1,02 m (t.o.v. +0.90 m zonder de invloed van 10% extra grondwatervoeding). Door de verhoging van de stijghoogten wordt eveneens het effect van de winningen groter (diepere afpompingskegels).

Tabel 4.5: Stijghoogteverschil ten gevolge van een verandering van de hydraulische doorlatendheden (HK) van modellen 5 en 3 en van de grondwatervoeding ($\pm 10\%$); afzonderlijk en gecombineerd.

Verandering parameters: Hydraulische doorlatendheid (K) en grondwatervoeding (RECH)	Param	Enkel K5		Enkel K3		Enkel RECH		Combinatie	
	K5	MIN	MAX	REF	REF	REF	REF	MIN	MAX
	K3	REF	REF	MIN	MAX	REF	REF	MIN	MAX
	RECH	REF	REF	REF	REF	+10%	-10%	+10%	-10%
Stijghoogteverschil [m] laag 5		+1.09	-0.84	+0.18	-0.14	+0.18	-0.22	+1.43	-1.15
Stijghoogteverschil [m] laag 3		+0.67	-0.50	+0.20	-0.16	+0.16	-0.19	+1.02	-0.81



Figuur 4.13: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor een combinatie van minimale doorlatendheden ($HK_5 = 3$ m/d en $HK_3 = 4$ m/d) en een toename van de grondwatervoeding met 10%: h_s minus $h_{referentie}$.

4.9. SAMENVATTING GEVOELIGHEIDSANALYSE

Op basis van de analyse van de relatieve gevoeligheden (S_r) van de verschillende parameters kan het volgende geconcludeerd worden:

- De gevoeligste parameter is de horizontale hydraulische doorlatendheid van modellaag 5 of HCOV-eenheid 0250 (HK_5), met een $S_r = 5,12$. De gemiddelde verandering in stijghoogte bij een variatie tussen 3 en 30 m/d voor het gehele modelgebied bedraagt ongeveer 1 m, met extremen op de heuvelruggen in het uiterste zuidoosten tot iets meer dan 15 m verschil (hoger).
- Wat de hydraulische doorlatendheden betreft is naast HK_5 enkel HK_3 (hydraulische doorlatendheid modellaag 3, HCOV 0230) matig gevoelig, terwijl de modellen 1, 2 en 4 weinig gevoelig ($S_r < 1$) blijken te zijn.
- De parameters 'grondwatervoeding', 'bodemconductantie rivieren' en in mindere mate 'conductantie van de drains' en 'debiet winningen' bleken eveneens een significante relatieve gevoeligheid ($S_r > 1$) te vertonen. De parameters 'vaste stijghoogte randvoorwaarde' en 'conductantie stromingsrandvoorwaarde' bleken weinig tot niet gevoelig.
- Indien de meest gevoelige parameters gecombineerd worden in één scenario worden de veranderingen versterkt. Voor een scenario met een minimum waarde voor HK_5 en HK_3 in combinatie met een verhoogde grondwatervoeding (+10%) loopt de gemiddelde verandering (toename) in stijghoogte op tot bijna 1,5 m in modellaag 5, met extremen in het uiterste zuidoosten tot bijna 18 m. De effecten rondom winningsputten zijn omgekeerd en worden versterkt (diepere afpompingskegels) onder invloed van toenemende stijghoogten.

Voor de kalibratie wordt gefocust op de meest gevoelige parameters.

5. KALIBRATIE

Het doel van modelkalibratie is de parameters, in de eerste plaats de K-waarden, aan te passen of te optimaliseren opdat een zo goed mogelijke overeenkomst tussen de berekende en de gemeten stijghoogten wordt verkregen.

Op basis van de analyses van de beschikbare peilputten en tijdsreeksen in Deelopdracht 1 (cfr. paragraaf 2.5) werd een selectie gemaakt van de definitieve observatiepunten voor kalibratie. Hierbij werden nog een reeks peilputten buiten beschouwing gelaten om diverse redenen, met name:

- Gezien het een regionale modellering betreft werden de peilputten van meetnet 7 (peil gemeten in winningsputten), aan Vlaamse zijde, buiten beschouwing gelaten. Er werden 15 observatiepunten verwijderd.
- Peilputten van meetnet 5 (Vlaanderen) die binnen de invloedssfeer (een straal van 500 m) van een winning gelegen zijn, werden eveneens verwijderd. Het betreft 201 observatiepunten.
- Aan Nederlandse zijde werden eveneens de putten gelegen binnen de invloedssfeer van een winning buiten beschouwing gelaten. Het betreft 5 observatiepunten.
- Tot slot werden nog 10 observatiepunten (Vlaanderen) verwijderd, omdat hun peil een te grote afwijking (tot enkele meters) vertoonden met zeer nabij gelegen putten. Het betreft putten uit de meetnetten 4 en 5, met name: 1-0993, 1-1043, 1-1065 (laag 1); 1-0174, 1-0041, 1-0905 (laag 2); 1-0788, 1-0790, 1-0024, 1-0766 (laag 5).

Uiteindelijk werden 650 observatiepunten weerhouden voor de kalibratie. Voor elk van de weerhouden putfilters werd de gemiddelde stijghoogte voor het jaar 2000 berekend, die dan bij de kalibratie vergeleken werd met de berekende stijghoogte. Aan Vlaamse zijde betreft het putfilters met een meetreeks voor het jaar 2000 bestaande uit tenminste acht metingen (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.5). In het geval van een peilput met meer dan één filter in dezelfde modellaag werd de gemiddelde stijghoogte over de verschillende filters berekend en als één enkel observatiepunt beschouwd in het model. Tabel 5.1 geeft een overzicht van het aantal observatiepunten per modellaag. Figuur 5.1 toont de locatie van de observatiepunten per modellaag in het modelgebied. Een peilputlocatie kan verschillende observatiepunten, in verschillende HCOV-eenheden of modellagen, bevatten.

Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse kon overgegaan worden tot de feitelijke kalibratie. In eerste instantie werd getracht om de K-waarden van modellagen 5 en 3 te optimaliseren met behulp van de automatische kalibratieroutine PEST (Parameter ESTimation; Doherty, 1996). PEST maakt aan de hand van 'input template files', die een beschrijving omvatten van de invoerbestanden van het model, de originele 'inputfiles' van het model aan en start die dan zelf op. Na afloop van de simulatie leest het programma de berekende resultaten aan de hand van de 'output template files', die een beschrijving van de

uitvoerbestanden omvatten, en vergelijkt deze met de observatiepunten. Op basis hiervan worden de invoergegevens vervolgens aangepast en de cyclus herbegint tot aan het door de gebruiker opgelegde criteria wordt voldaan. Het past hierbij zelf de parameters aan tot de optimale waarden bereikt zijn. De optimalisatie is gebaseerd op de Gauss-Marquardt-Levenberg methode. Meer uitleg kan onder meer teruggevonden worden in Doherty (1996).

Tabel 5.1: Overzicht van het aantal observatiepunten per modellaag in het modelgebied gebruikt bij de kalibratie.

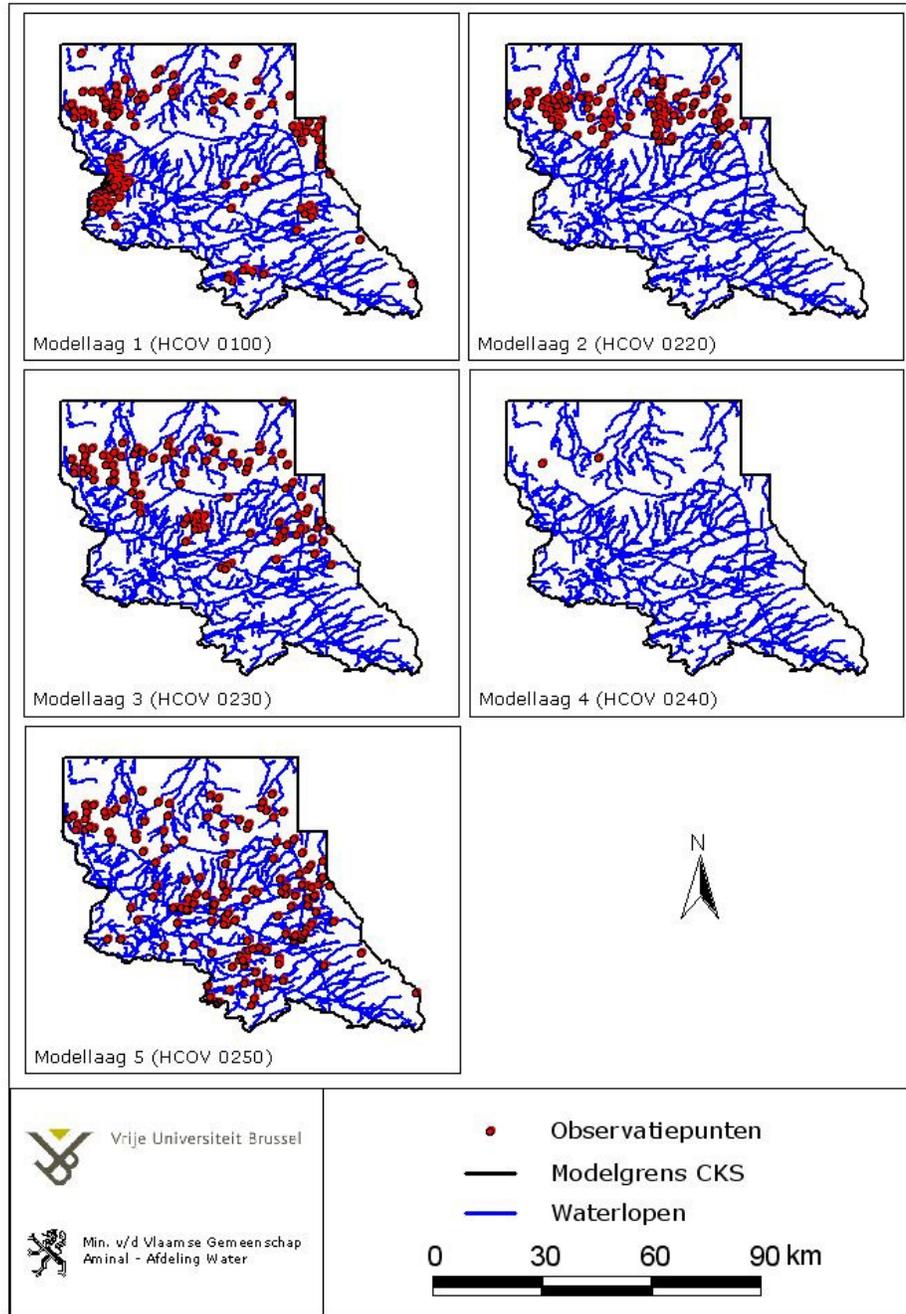
Modellaag	Aantal observatiepunten
1	222
2	134
3	120
4	2
5	172
Totaal:	650

Tijdens de kalibratie met PEST bleek echter dat, ondanks verschillend gekozen startwaarden voor de parameter(s), er convergentieproblemen optraden en het model instabiel werd. Daarom werd besloten om van de automatische kalibratiemethode met PEST af te stappen en de K-waarden verder te optimaliseren via trial & error, op basis van de som van de kwadratische verschillen ('total sum of squared residuals', TSSR), automatisch berekend in GMS na elke modelsimulatie:

$$TSSR = \sum_{i=1}^n (h_{sim} - h_{obs})^2$$

waarbij n het aantal observatiepunten is (650 in totaal) en h_{sim} en h_{obs} respectievelijk de gesimuleerde en geobserveerde stijghoogten zijn. De K-parameters werden één voor één, van meest gevoelig tot minst gevoelig, geoptimaliseerd. In geval van een afname in TSSR werd de aanpassing in parameterwaarde weerhouden.

Tabel 5.2 geeft de optimale K-waarden, verkregen na handmatige modelkalibratie. Voor de hydraulische doorlatendheid van modellaag 1 (HCOV 0100) werd bij de handmatige kalibratie optimale waarden gevonden die buiten de opgegeven fysische range, (zie Tabel 3.1) gelegen zijn. Uit puntparameterwaarden voor de hydraulische doorlatendheid van laag 1 werden echter vergelijkbare waarden gevonden die eveneens buiten deze fysische range gelegen zijn, waardoor de gevonden waarde van 20 m/d als aanvaardbaar werd beschouwd. Bij de kalibratie werd wel vastgesteld dat een hogere waarde in bepaalde gevallen leidt tot convergentieproblemen voor de waterbalans.



Figuur 5.1: Overzicht van de observatiepunten per modellaag die gebruikt werden bij de kalibratie.

Tabel 5.2: Optimale K-waarden.

Model- laag	HCOV-EENHEDEN		K [m/d]
	SUB	BASIS	
1	0130		1,3
	0140		5,0
	0150	0151	20,0
		0152	7,5
2	0220		0,2 - 13,2*
3	0230		12,5
4	0240		0,1
5	0250		9,75

* K-waarden voor laag 2 zijn ruimtelijk verdeeld en werden geïnterpoleerd a.h.v. beschikbare isopachen en puntwaarden (zie paragraaf 3.5).

Tijdens de modellering en kalibratie werd eveneens vastgesteld dat de voeding van de kanalen naar het grondwater te hoog werd ingeschat. De beheerder van de Kempische kanalen, de Scheepvaart nv, gaat uit van een verlies van 0,3 m³/s (ongeveer 26.000 m³/d) voor het volledige Kempische kanalenet (bron: concessie voor het bouwen en exploiteren van waterkrachtcentrales op de waterwegen van de Dienst voor de Scheepvaart, bijlage bij bestek 4.209.00). Met de oorspronkelijke conductantiewaarden voor de kanalen (zie deelrapport 1) bedraagt de voeding vanuit de kanalen bijna het viervoudige. Bovendien dient rekening gehouden te worden met het feit dat de delen gelegen in het Maassysteem hierbij niet zijn meegerekend. In een poging om de veronderstelde verlieswaarden te benaderen, werd de conductantie voor de kanalen verlaagd. Rekening houdend met het feit dat een klein deel van de Kempische kanalen niet in het model opgenomen zijn, wordt verondersteld dat een verlaging van de kanaalconductanties met een factor 10, resulterend in een totale voeding van ruim 21.800 m³/d vanuit de kanalen, het best de geschatte verliezen benaderd.

5.1. STIJGHOOGTE OPBSERVATIEPUNTEN

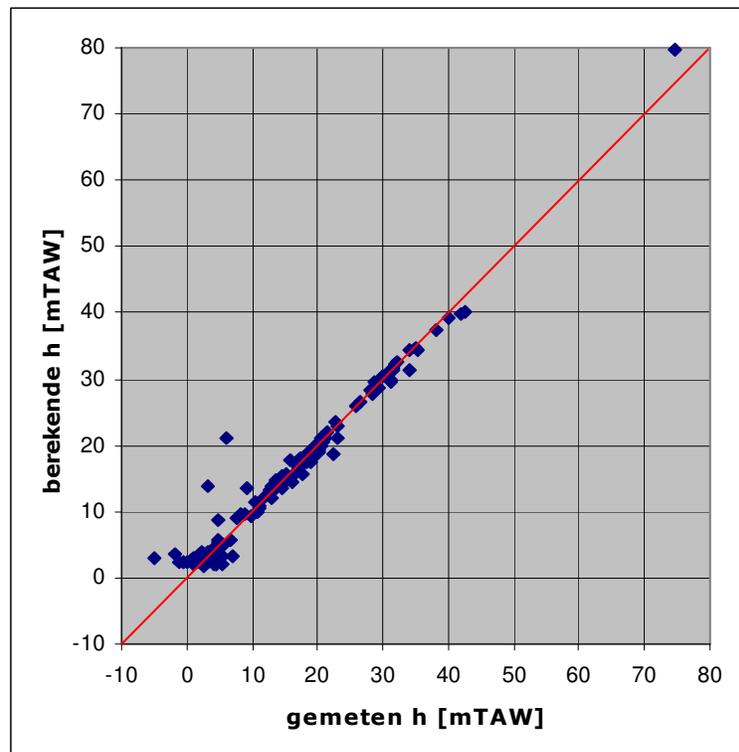
De overeenkomst tussen de berekende en gemeten stijghoogten kan uitgedrukt worden onder de vorm van een kalibratiecriterium, waaronder de gemiddelde afwijking, de gemiddelde absolute afwijking, en de wortel van de gemiddelde kwadratische verschillen ('root mean squared error', RMSE) of standaardafwijking tussen de gesimuleerde stijghoogten h_{sim} en de gemeten stijghoogten h_{obs} :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{sim} - h_{obs})^2}$$

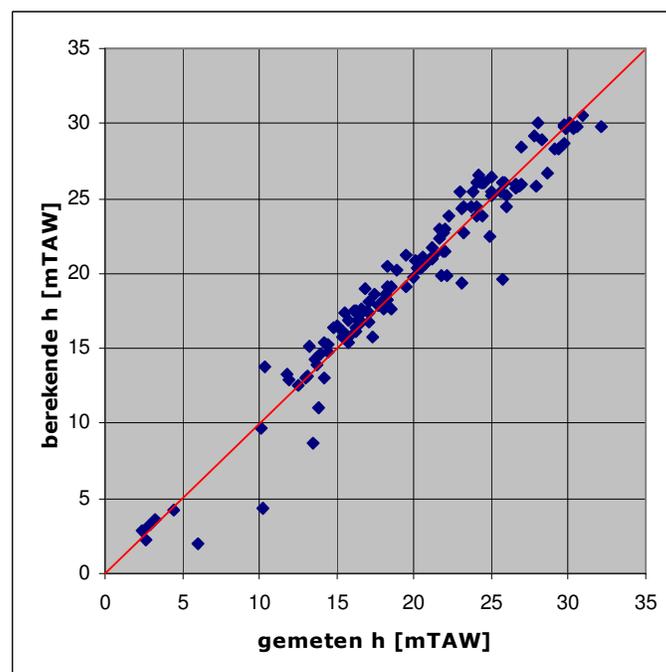
waarbij n het aantal observatiepunten is. De resultaten van de modelkalibratie zijn samengevat in Tabel 5.3. Figuren 5.2 t.e.m. 5.6 geven de afwijking tussen de gemeten en gesimuleerde (gekalibreerde) stijghoogten weer voor achtereenvolgens modellaag 1, 2, 3, 4 en 5.

Tabel 5.3: Resultaten modelkalibratie.

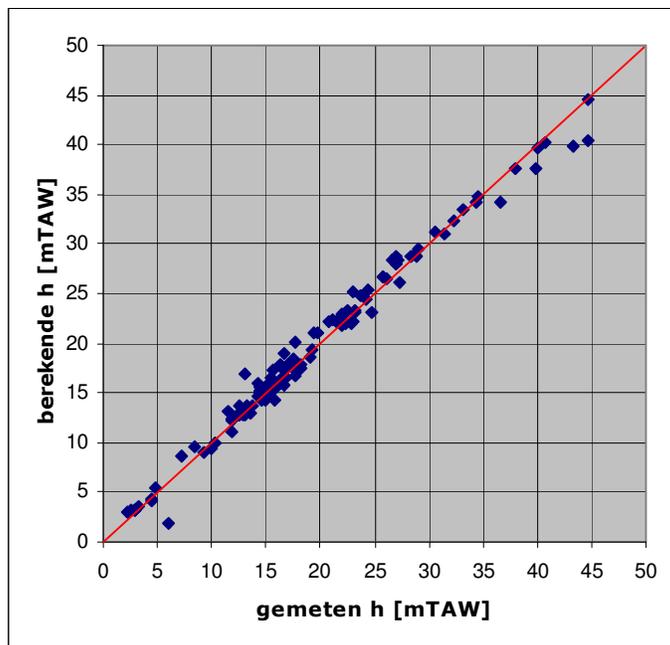
Model-laag	Aantal observatiepunten	Gemiddelde afwijking [m]	Gemiddelde absolute afwijking [m]	RMSE [m]
1	183	-0,27	1,08	1,97
2	134	-0,12	1,03	1,46
3	119	-0,18	0,81	1,17
4	2	-0,02	0,97	0,97
5	172	-0,03	0,94	1,44
Totaal	610	-0,15	0,98	1,58



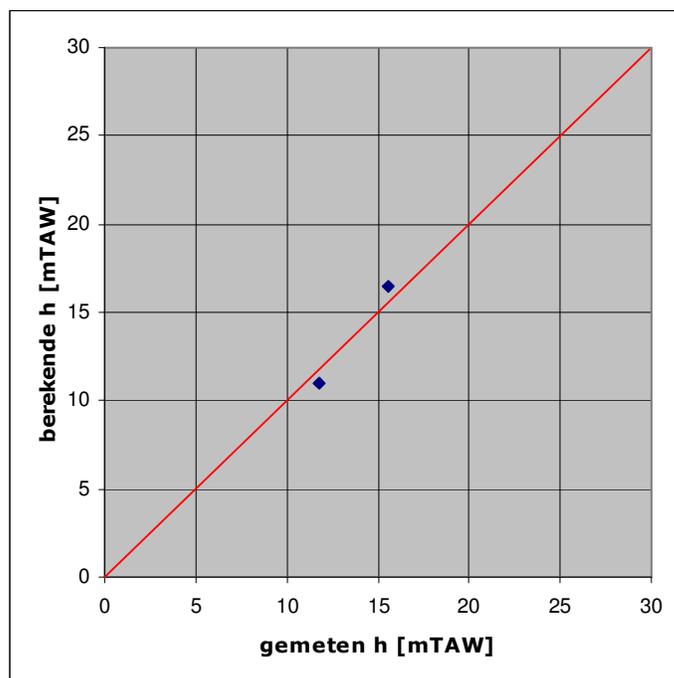
Figuur 5.2: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 1 ($R^2 = 0,97$).



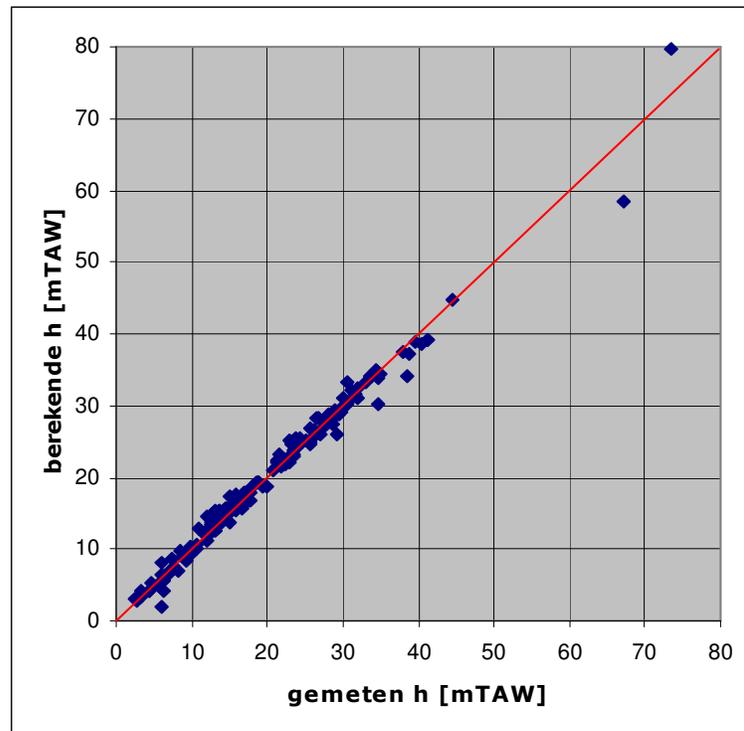
Figuur 5.3: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 2 ($R^2 = 0,95$).



Figuur 5.4: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 3 ($R^2 = 0,98$).



Figuur 5.5: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 4 ($R^2 = 1,00$).



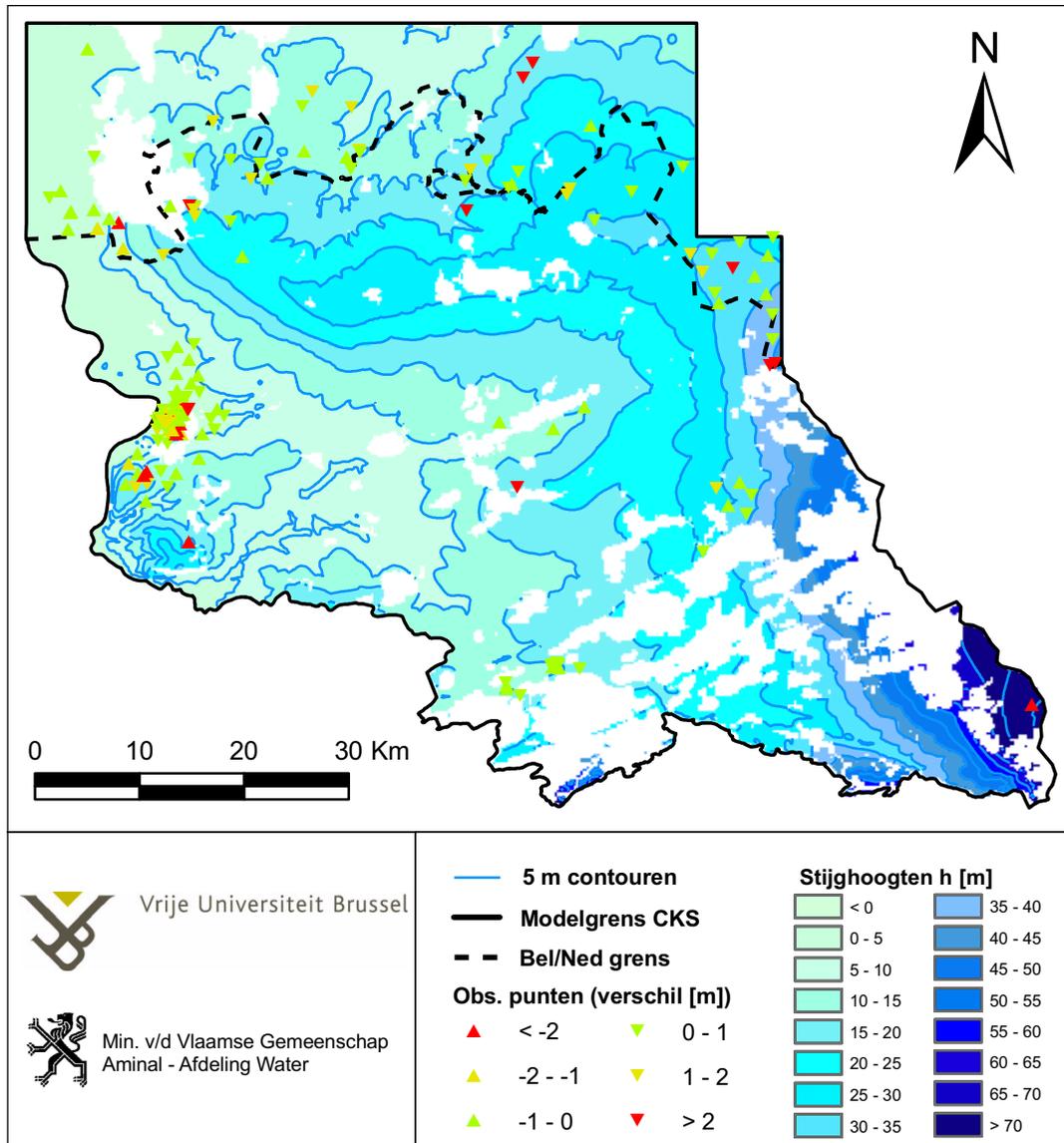
Figuur 5.6: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 5 ($R^2 = 0,98$).

Figuren 5.7 t.e.m. 5.11 tonen de gesimuleerde stijghoogten voor achtereenvolgens de modellen 1, 2, 3, 4 en 5, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde en een kleursymbool dat de grootte van de afwijking (verschil tussen gemeten en gesimuleerde waarde) weergeeft. Volgende kleurcode werd gebruikt: groen: afwijking < 1 m; geel: afwijking tussen 1 en 2 m; rood: afwijking > 2 m. Uit een visuele controle blijkt duidelijk een goede overeenkomst tussen de gesimuleerde stroomrichting en de stroomrichting zoals kan afgeleid worden op basis van de geïnterpoleerde stijghoogtekaarten, cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.5.

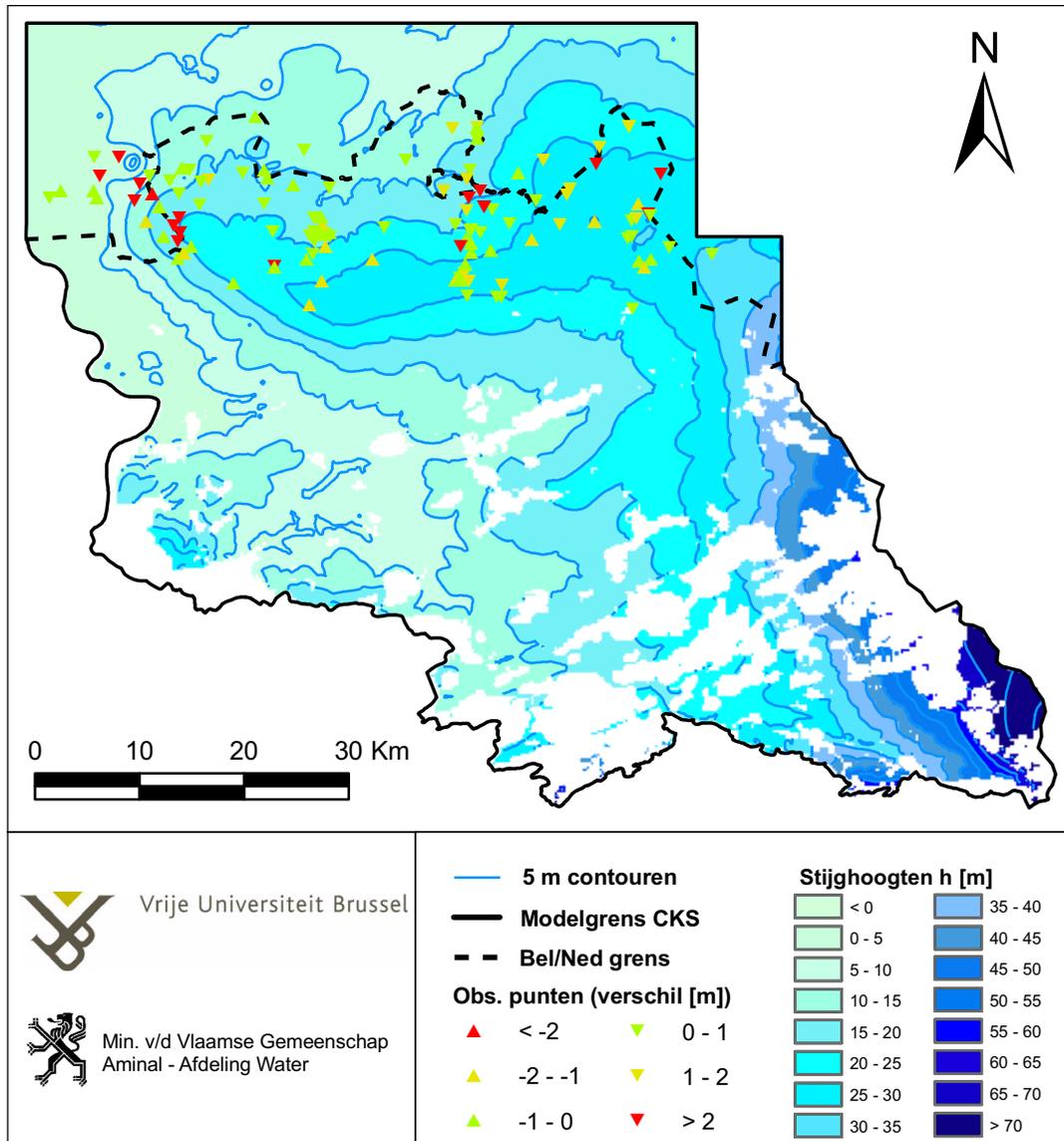
Uit de ruimtelijke distributie van de afwijkingen kan het volgende afgeleid worden:

- Modellaag 1: over het algemeen is er een relatief goede overeenkomst ($R^2 = 0.97$) voor de observatiepunten in modellaag 1. Ondanks een verbetering van de resultaten in Antwerpenstad (cfr. Paragraaf 3.4.3) blijven er in deze zone, en dan vooral nét ten oosten ervan, een aantal observatiepunten een grote afwijking vertonen. Dit is o.a. het geval voor de observatiepunten 1-1035 en 1-1039. Dit is nog steeds een belangrijke oorzaak voor de relatief hoge RMSE (1,97 m) voor laag 1. Ook de observatiepunten 1-0912 en 1-0962 vertonen een grote afwijking. Mogelijk betreft het foute metingen, vermits de peilen in de nabijgelegen (< 500 m) observatiepunten en waterlopen sterk verschillen (> 8 m). Indien deze 4 punten (met de grootste afwijking) buiten beschouwing gelaten worden, wordt de RMSE voor laag 1 overigens beduidend beter, met name 1,25 m.
- Modellaag 2: er is een lichte overschatting (-0,12 m) van de stijghoogten ($R^2 = 0.95$). Ter hoogte van de Kalmthoutse heide en de zone ten oosten van Rijkevorsel en Hoogstraten (bovenstrooms deel van de valleien van de Laak en de Mark), worden de grootste afwijkingen opgetekend en lopen de verschillen op tot 1,5 m en meer. De RMSE bedraagt 1,46 m.
- Modellaag 3: over het algemeen is er een goede overeenkomst ($R^2 = 0,98$) voor de observatiepunten in modellaag 3 (RMSE: 1,17 m). Enkel voor een aantal observatiepunten, o.a. deze gelegen nabij de oostelijke modelgrens en ter hoogte van de Kalmthoutse heide, zijn de afwijkingen groter (> 2 m).
- Modellaag 4: vermits het een kleiige laag betreft bevat deze laag slechts 2 observatiepunten. Er is een zeer goede overeenkomst ($R^2 = 1,00$ - RMSE: 0,97 m).
- Modellaag 5: over het algemeen is er een goede overeenkomst ($R^2 = 0.98$) voor de observatiepunten in modellaag 5 (RMSE: 1,44 m). De meeste observatiepunten vertonen een geringe afwijking (< 1 m) tussen gemeten en berekende stijghoogte. Voor een aantal verspreide observatiepunten, voornamelijk in het zuiden en oosten, zijn de afwijkingen echter groter (> 2 m).

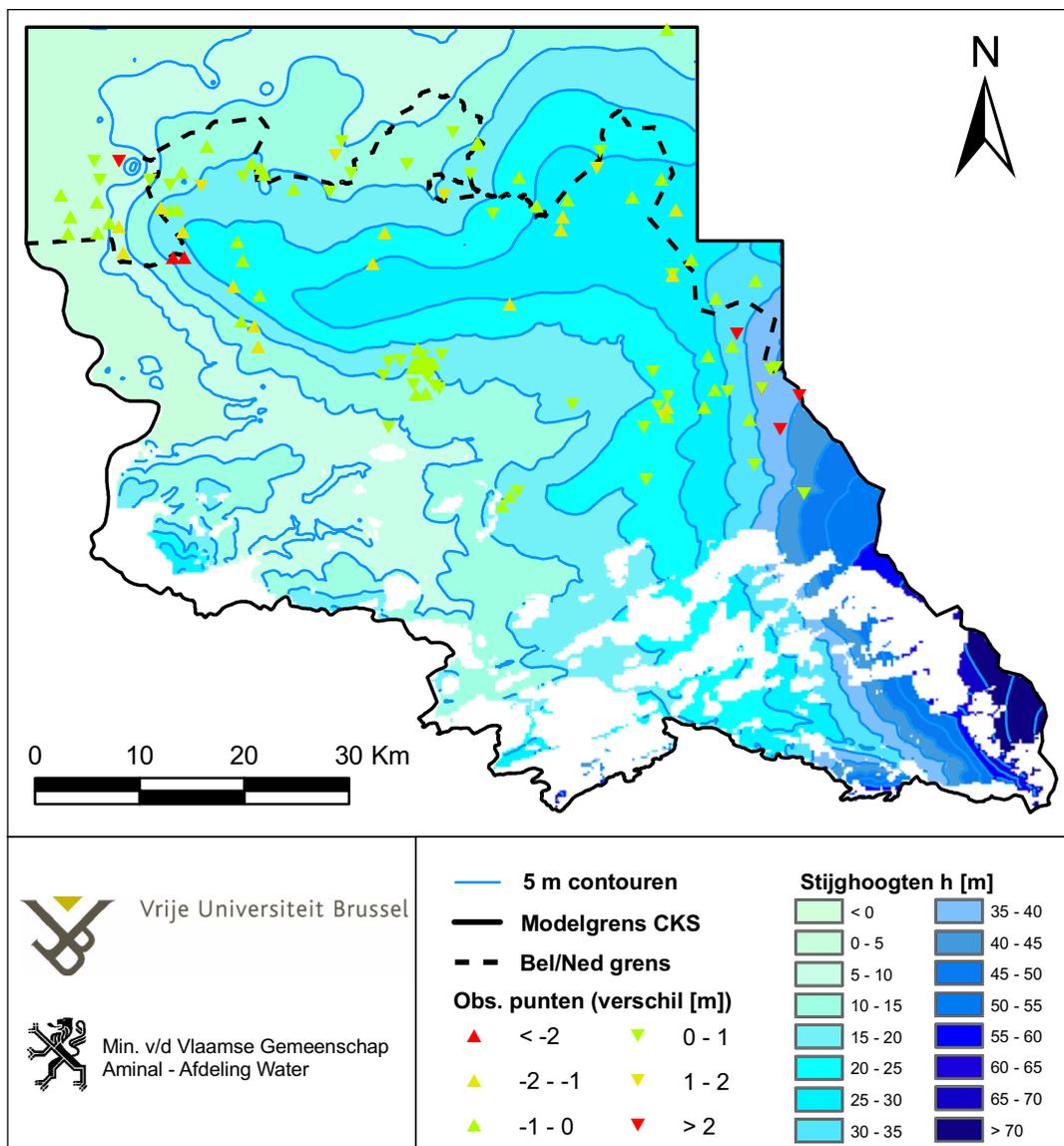
Figuur 5.12 tenslotte toont het freatisch peil t.o.v. maaiveld (hierbij wordt het DHM van OC GIS Vlaanderen verondersteld) en tevens de zogenaamde 'flooded cells'.



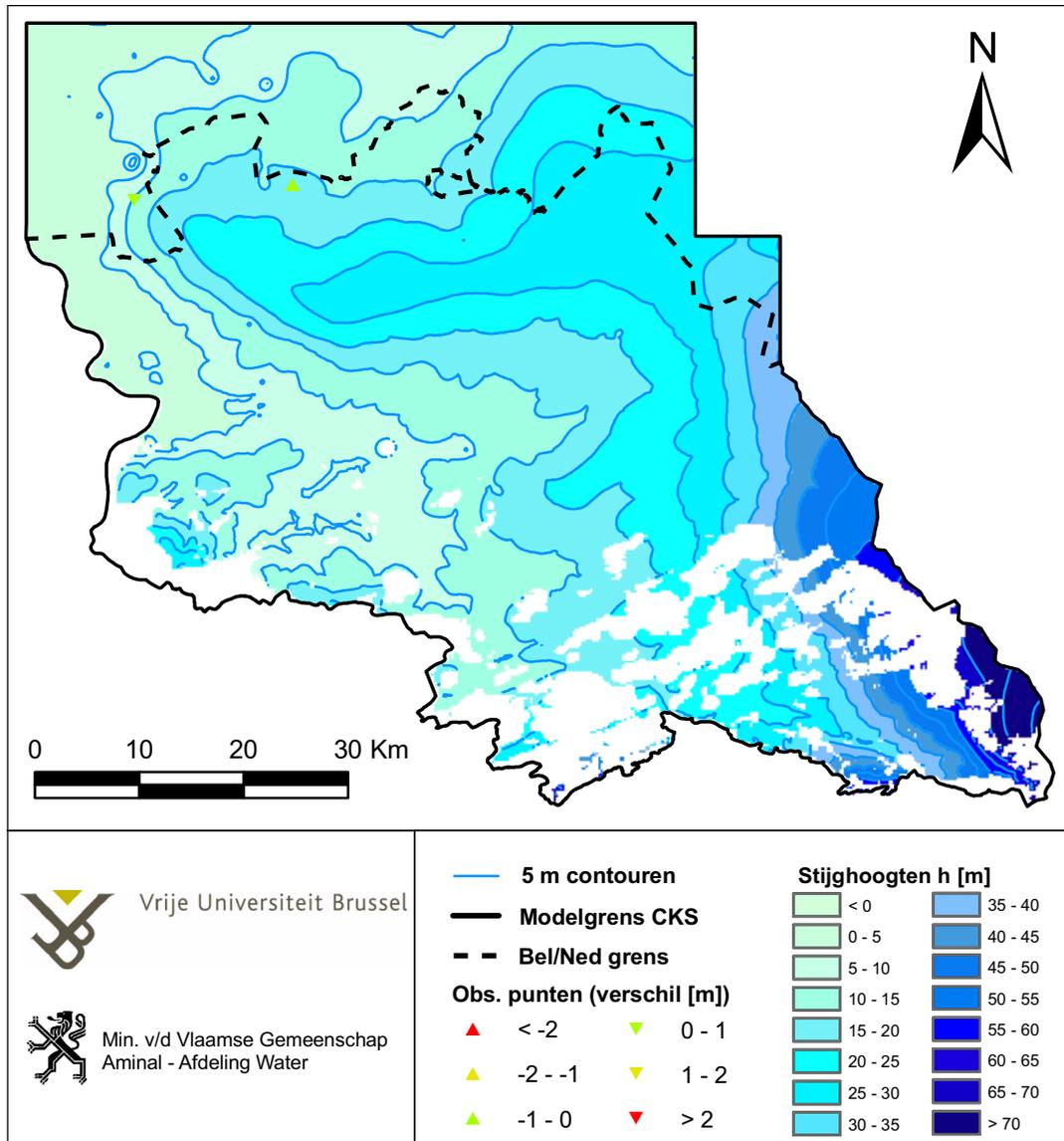
Figuur 5.7: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 1, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de afwijking weergeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m.



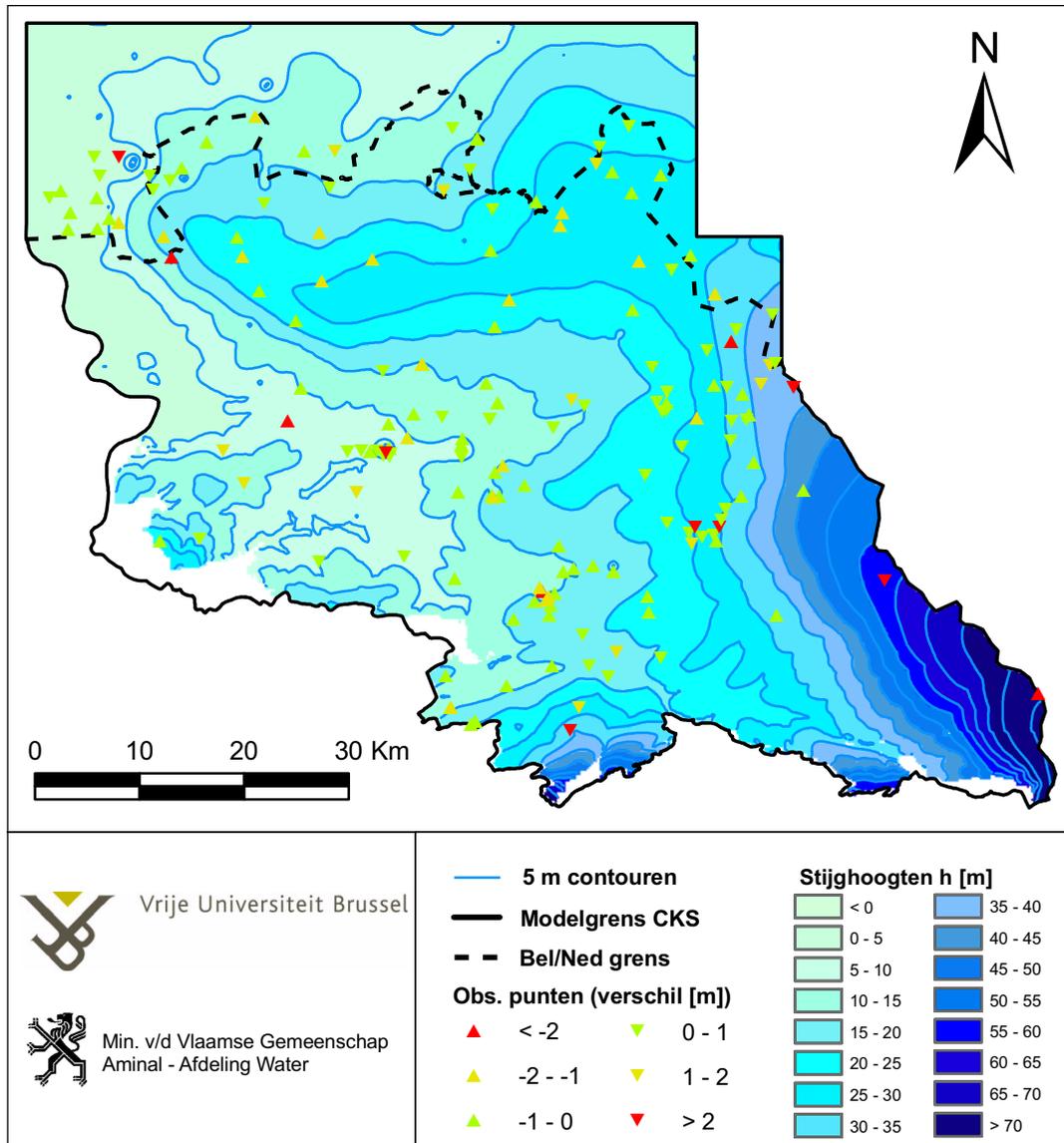
Figuur 5.8: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 2, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: <math>< 1\text{m}</math>; geel: $1 - 2\text{ m}$; rood: $> 2\text{ m}$.



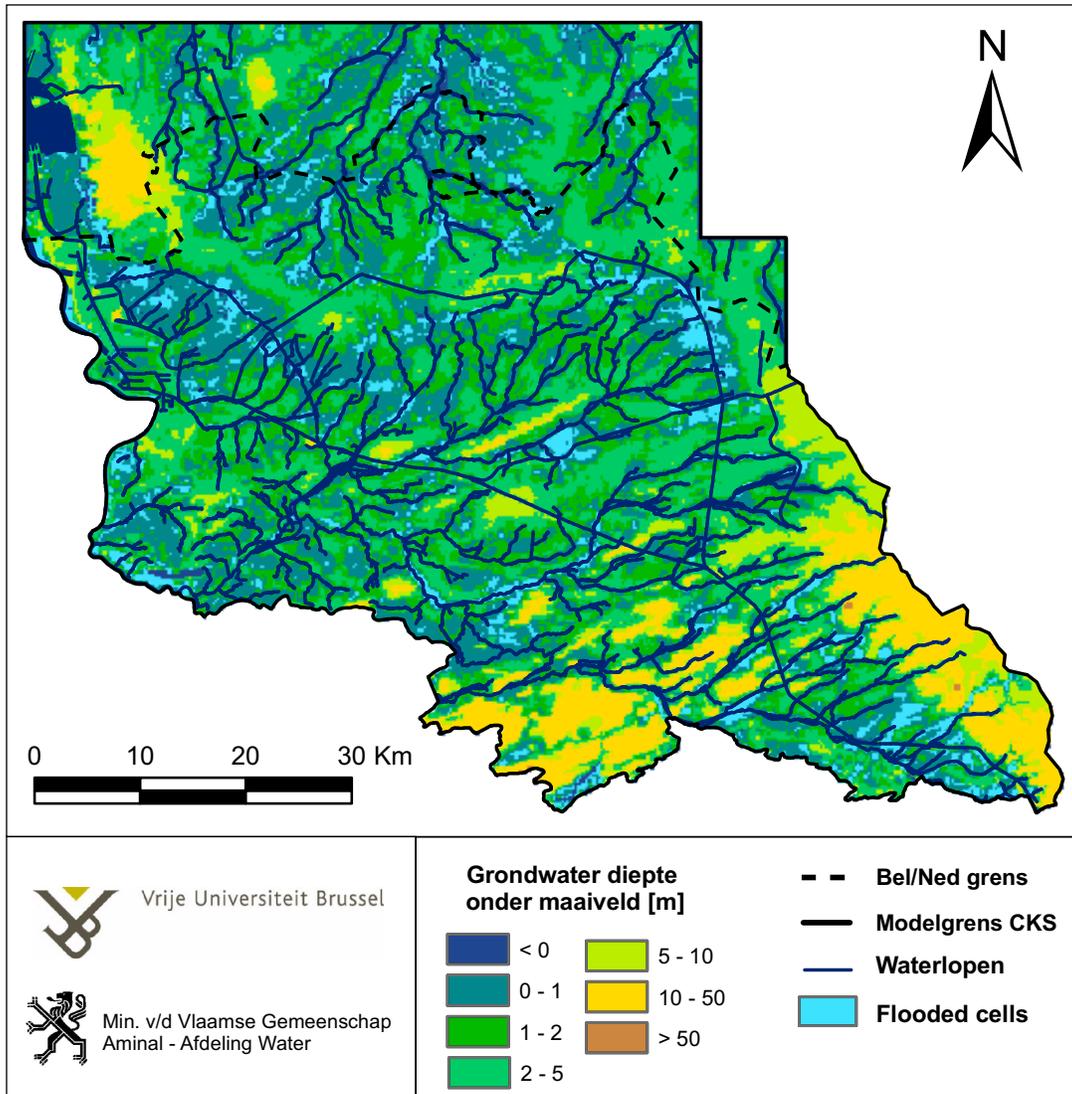
Figuur 5.9: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 3, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m.



Figuur 5.10: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 4, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m.



Figuur 5.11: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor modellaag 5, samen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarde met een kleurcode die de absolute afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m.



Figuur 5.12: Gesimuleerd freatisch peil [m] onder maaiveld (=DHM Vlaanderen).

5.2. WATERBALANS

Bij de kalibratie werd eveneens rekening gehouden met de totale waterbalans van de modellering. Een eerste streefdoel bij de modellering is een waterbalans in evenwicht (IN – OUT = 0). Vervolgens werd gestreefd naar een realistische waterbalans⁴ waarbij er dus sprake is van een realistische verhouding tussen de verschillende IN en OUT componenten. Tabel 5.4 en figuur 5.13 tonen de bijdrage van de afzonderlijke IN en OUT componenten.

Tabel 5.4: Totale waterbalans, met de afzonderlijke bijdrage van elke IN/OUT component.

WATERBALANS BRON	Debiet Q [$10^3 \cdot \text{m}^3/\text{d}$]		Percentage [%]	
	IN	OUT	IN	OUT
STORAGE	0.0	0.0	0.0	0.0
CONSTANT HEAD	143.2	-312.0	3.6	7.8
WELLS	0.0	-489.2	0.0	12.2
DRAINS	0.0	-686.0	0.0	17.1
RIVER LEAKAGE	237.4	-2378.2	5.9	59.3
HEAD DEP BOUND	33.7	-146.8	0.8	3.7
RECHARGE	3594.6	0.0	89.7	0.0
TOTAL	4009.0	-4012.1	100.0	100.0
IN - OUT = -3140 m³				
PERCENT DISCREPANCY = 0,08%				

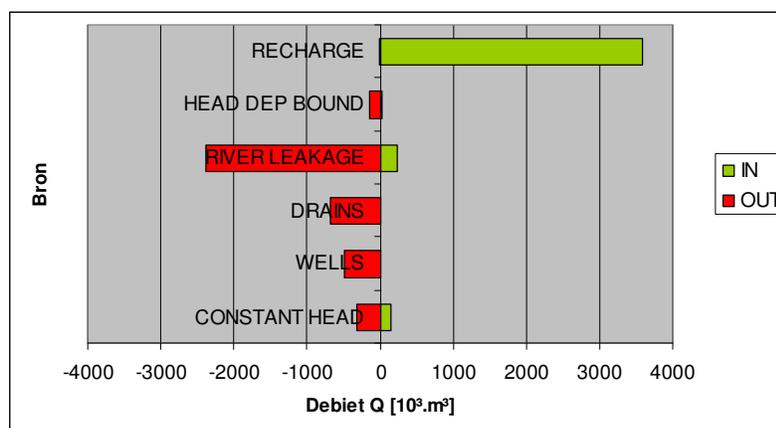


Figure 5.13: De bijdrage van de verschillende IN/OUT componenten tot de totale waterbalans van het model.

⁴ Op basis van de kennis en ervaring opgedaan in het kader van eerdere modelleringen, kon een ruwe inschatting gemaakt worden van een 'realistische' waterbalans.

De grondwatervoeding (RECHARGE) neemt het grootste deel (90%) van de INPUT voor haar rekening. Ook de rivieren (6%) en de vaste stijghoogte (4%) leveren een bijdrage als INPUT voor het model. Het grootste 'verlies' gebeurt via de rivieren (59%). Er verdwijnt dus bijna 7 keer meer water uit het model, dan dat er via de rivieren gevoed wordt. Wat volkomen logisch is vanwege het voornamelijk drainerende karakter van de rivieren in Vlaanderen. Andere belangrijke OUT-bronnen zijn: (lokale) drainage (17%) en grondwaterwinningen (12%). Ook via het raakvlak met de onderliggende pakketten HCOV 0400 en 0600, ter hoogte van de Diestiaangeul, verdwijnt er een eerder beperkte hoeveelheid (4%) uit het model. Tijdens de kalibratie werd heel wat aandacht besteed aan deze zone⁵ om tot een realistische waarde te komen. Meetgegevens of detailinformatie betreffende deze flux doorheen de Diestiaangeul ontbreken echter. Tot slot is er nog een beperkt 'verlies' via de vaste stijghoogte (8%) in het noorden.

⁵ Via het aanpassen van conductantie en de opgelegde stijghoogten voor de stromingsrandvoorwaarde (General Head Boundary – cfr. §3.4.1) werd gepoogd de flux doorheen de Diestiaangeul te modelleren.

REFERENTIES

Anderson, M.P. en Woessner, W.W. (1992). *Applied Groundwater Modeling*. Academic Press, Inc., San Diego, California, USA, 381 p.

Batelaan, O. en De Smedt, F. (2001). *WetSpass: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modelling*. In: Gehrels, H., Peters, J., Hoehn, E., Jensen, K., Leibundgut, C., Griffioen, J., Webb, B. and Zaadnoordijk, W.-J. (Eds.). *Impact of Human Activity on Groundwater Dynamics*, IAHS Publ. No. 269: 11-17.

Brigham Young University, Utah, USA, Environmental Modeling Research Laboratory (2003): *GMS 5.1 Tutorials*.

De Lange, W.J. (1996). NAGROM, a groundwater model for national groundwater management and regional and local studies. *EWPC 6 (5)*, 63-67.

Doherty (1996). *Groundwater data utilities*. Queensland Department of Natural Resources.

Goossens, D. (1984). *Inleiding tot de geologie en geomorfologie van België*, Uitgeverij van de Berg, Enschede, 228 p.

Harbaugh, A.W. & McDonald, M.G. (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model – User guide to modularization concepts and the groundwater flow process. Open-File Report 00-92, USGS, Reston, Virginia, 121 p.

McDonald, M. G. and Harbaugh, A.W. (1988). *A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model*. Vol. Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1 U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 586p.

Meyus, Y., Woldeamlak, S.T., Batelaan, O., De Smedt, F. (2004b). *Opbouw van een Vlaams Grondwatervoedingsmodel: Eindrapport*. Rapport in opdracht van AMINAL, afdeling Water, Brussel.

OC-GIS Vlaanderen (2002). Rasterversie van het Bodembedekkings- en Bodemgebruiksbestand, opname 2001, VLM/OC (GIS-Vlaanderen)

OC-GIS Vlaanderen (2000). *Digitale vectoriële versie van de Vlaamse Hydrologische Atlas (VHA)*, MVG – LIN – AMINAL – Afdeling Water, toestand 04/07/2000. CD-ROM opgemaakt door OC-GIS Vlaanderen.

OC-GIS Vlaanderen (2001). *Digitale vectoriële versie van de Bodemkaart*, IWT, toestand 15/05/2000. CD-ROM opgemaakt door OC-GIS Vlaanderen.

OC-GIS Vlaanderen (2001). *Digitale vectoriële versie van de Tertiaire geologische kaart*, MVG – EWBL – Natuurlijke Rijkdommen en Energie, toestand 01/05/2001. CD-ROM opgemaakt door OC-GIS Vlaanderen.

OC-GIS Vlaanderen (2004). Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen, MVG-LIN-AMINAL-afdeling Water en MVG-LIN-AWZ-afdeling Waterbouwkundig Laboratorium en Hydrologisch onderzoek (GIS-Vlaanderen). CD-ROM opgemaakt door OC-GIS Vlaanderen.

Op 't Eyndt T., Van Valckenborgh J., Sanders J. (2002) Het Bodembekings- en bodemgebruiksbestand Vlaanderen 2002, Vlaamse Landmaatschappij, afdeling Ondersteunend Centrum GIS-Vlaanderen.

Rijkswaterstaat Nederland (2000). AHN 2000 - Actueel Hoogtebestand Nederland.

Soresma (2004). Regionale en subregionale grondwatermodellering in het kader van het Ontwikkelingsplan Demer (2004). Rapport Soresma nv, studie uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Dep. Leefmilieu en Infrastructuur, Afd. Natuur in samenwerking met Afd. Water.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Ramberger, J.S., Papendick, R.L. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer. Journal*, 50 (4), p. 1031-1036.

Universiteit Gent (jaartal onbekend). Stijghoogtekaart van Antwerpen op basis van peilmetingen 1984-2001 en rekening houdend met permanente bemaling, opgesteld door Dieter Vandeveld, UG.

Viaene, P., Vlieghe, C., De Smedt, P. (1997). Ontwikkeling van praktijkgerichte modellen voor watervoerende lagen, SVW, PIDPA en VMW, 141 p.

Wemaere, I. en Marivoet, J. (1995). Geological disposal of conditioned high-level and long lived radioactive waste. Updated regional hydrogeological model for the Mol site (the north-eastern Belgium model). Rapport in opdracht van NIRAS/ONDRAF, SCK-CEN, R-3060, Mol, 72 pag. + bijlagen.

Wouters, L. en Vandenberghe, N. (1994). Geologie van de Kempen. Een synthese. NIROND-94-11 - Oktober 1994, NIRAS/ONDRAF, Brussel, 208 pag.

