



Vrije Universiteit Brussel

ONTWIKKELING VAN REGIONALE MODELLEN TEN BEHOEVE VAN HET VLAAMS GRONDWATER MODEL (VGM) IN GMS/MODFLOW PERCEEL 2: MAASSYSTEEM

DEELRAPPORT 2: OPBOUW VAN HET GRONDWATERSTROMINGSMODEL,
GEVOELIGHEIDSANALYSE EN CALIBRATIE



OPDRACHTGEVER:

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

AUTEURS: J. Severyns, F. De Smedt

Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde
Vrije Universiteit Brussel (VUB), Pleinlaan 2, 1050 Brussel

OKTOBER 2006

Inhoudstabel

1 ZIE DEELOPDRACHT 1	1
2 ZIE DEELOPDRACHT 1	1
3 OPBOUW VAN HET GRONDWATERMODEL	1
3.1 CONCEPTUEEL MODEL	1
3.2 SOFTWARE.....	2
3.3 MODELSTRUCTUUR	3
3.3.1 <i>Beschrijving van het model</i>	3
3.3.2 <i>Hydrogeologisch concept</i>	3
3.3.3 <i>Randvoorwaarden aan de rand van het modelgebied (BOUNDARY-conditions)</i>	8
3.3.4 <i>Digitaal Hoogtemodel</i>	9
3.4 ANDERE RANDVOORWAARDEN	11
3.4.1 <i>Hydrografie (RIVER-conditions)</i>	11
3.4.2 <i>Drainage (DRAIN-conditions)</i>	12
3.4.3 <i>Grondwaterwinningen (WELL-conditions)</i>	13
3.4.4 <i>Grondwatervoeding (RECHARGE)</i>	14
3.5 HYDRAULISCHE PARAMETERS	16
4 GEVOELIGHEIDSANALYSE	20
4.1 HYDRAULISCHE DOORLATENDHEID	22
4.2 GRONDWATERVOEDING	36
4.3 VASTE STIJGHOOGTE GRENSVOORWAARDEN	36
4.4 GRONDWATERWINNINGEN.....	38
4.5 DRAINAGE	38
4.5.1 <i>Drainconductantie</i>	38
4.5.2 <i>Onbekend drainageniveau</i>	39
4.6 WATERLOPEN.....	41
4.6.1 <i>Conductantie sedimentbodem</i>	41
4.6.2 <i>Maaspeil</i>	41
4.7 GECOMBINEERD EFFECT	44
5 CALIBRATIE	48
BEMERKINGEN	76
REFERENTIES	78
DIGITALE GEGEVENSSETS	80

Lijst met figuren

Figuur 3.1: Concept voor de opbouw van de modellagen. De rode puntstreeplijnen stellen uitwiggende lagen voor; de rode streeplijn duidt erop dat modellaag 8 ten zuiden van de Feldbissbreuk op “inactief” staat. Elke HCOV-subeenheid heeft een ander kleuropschrift; de HCOV-eenheden met een zwart opschrift zijn slecht doorlatende kleilagen. Voor de benaming van de HCOV-eenheden wordt verwezen naar Tabel 3.1.	5
Figuur 3.2: Effect van een breuk op de grondwaterstroming, uit: (Bense, 2002). In groen: zeer grof zand, in donkergeel: grof zand, in lichtgeel: fijn zand, in rood: zeer fijn zand, in blauw: klei.	5
Figuur 3.3: A. Normale situatie: infiltratie op de hoger gelegen delen met een relatief diepe grondwatertafel, en afvoer naar de lager gelegen delen in het landschap, waar de grondwatertafel dicht tegen het grondoppervlak staat. B. Effect van een breuk op de grondwaterstroming, uit: (Bense, 2002).	6
Figuur 3.4: Belangrijke breuken in het model. Ter hoogte van de grijs ingekleurde zone staat het Mioceen Aquifersysteem (HCOV 0250) door de sterke breukwerking in contact met het Oligoceen Aquifersysteem (HCOV 0400) en Paleoceen Aquifersysteem (HCOV 1000).	7
Figuur 3.5: Randvoorwaarden aan de rand van het modelgebied.	9
Figuur 3.6: Grondwatervoeding berekend met WetSpss (Meyus et al., 2004) (celresolutie: 250x250 m).	15
Figuur 3.7: Onderscheiden K-zones in het model. De K-zone HCOV 0213 komt overeen met het groen gearceerde deel <i>minus</i> het zwart gearceerde deel in het uiterste noordoosten van het modelgebied.	19
Figuur 4.1: Puntlocaties die gebruikt werden in de gevoeligheidsanalyse.	31
Figuur 4.2: Verandering in stijghoogte in modellaag 7 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0230 (i.e. 5 m/d) en HCOV 0250 (i.e. 3 m/d) : $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	32
Figuur 4.3: Verandering in stijghoogte in modellaag 7 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\max}$ HCOV 0230 (i.e. 7 m/d) en HCOV 0250 (i.e. 40 m/d) : $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	33
Figuur 4.4: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0212 (i.e. 0,0001 m/d) en HCOV 0230 (i.e. 5 m/d): $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	34
Figuur 4.5: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\max}$ HCOV 0212 (i.e. 0,01 m/d) en HCOV 0230 (i.e. 35 m/d): $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	35
Figuur 4.6: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een afname van 25% in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	37
Figuur 4.7: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 4 toename in drainconductantie (i.e. 4000 m ² /d t.h.v. mijnverzakkingsgebied en 1000 m ² /d elders in het modelgebied): $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	40
Figuur 4.8: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 2 afname in kanaalconductantie: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	42
Figuur 4.9: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 2 afname in rivier- en kanaalconductantie: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	43
Figuur 4.10: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk (i.e. 3 m/d) en een toename van 10% in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	45
Figuur 4.11: Verandering in stijghoogte in modellaag 6 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk (i.e. 3 m/d) en een toename van 10% in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$	46

Figuur 4.12: Verandering in stijghoogte in modellaag 7 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk (i.e. 3 m/d) en een toename van 10% in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}}$ minus h_s	47
Figuur 5.1: Overzicht van de observatiepunten die gebruikt werden bij de calibratie.	50
Figuur 5.2: Aangepaste parameterzones voor de K-zone HCOV 0230.	54
Figuur 5.3: Aangepaste parameterzones voor de K-zone HCOV 0250.	55
Figuur 5.4: Variabiliteit in K voor modellaag 1 na modelcalibratie.	59
Figuur 5.5: Lichte aanpassing van de modelgrens aan de oostrand van het gebied.....	61
Figuur 5.6: Gemeten <i>versus</i> berekende stijghoogten voor modellaag 1.	63
Figuur 5.7: Gemeten <i>versus</i> berekende stijghoogten voor modellaag 2.	63
Figuur 5.8: Gemeten <i>versus</i> berekende stijghoogten voor modellaag 4.	64
Figuur 5.9: Gemeten <i>versus</i> berekende stijghoogten voor modellaag 6.	64
Figuur 5.10: Gemeten <i>versus</i> berekende stijghoogten voor modellaag 7.....	65
Figuur 5.11: Gemeten <i>versus</i> berekende stijghoogten voor modellaag 8.....	65
Figuur 5.12: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0100, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking weergeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.	69
Figuur 5.13: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0211, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.	70
Figuur 5.14: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0213, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.	71
Figuur 5.15: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0215, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.	72
Figuur 5.16: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0230, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.	73
Figuur 5.17: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0250, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.	74
Figuur 5.18: Diepte onder maaiveld van de freatische grondwatertafel (na calibratie).....	75

Lijst met tabellen

Tabel 3.1: Modelconcept voor de lagenbouw.	4
Tabel 3.2: Overzicht van de K-zones.	17
Tabel 4.1: Gemiddelde waarde (referentie) en fysische range voor de hydraulische doorlatendheid per HCOV of K-zone, tesamen met de factoren waarmee K tijdens de gevoeligheidsanalyse gevarieerd werd t.o.v. de referentiewaarde.	21
Tabel 4.2: K-parameterzones gerangschikt volgens gevoeligheid op basis van de 'composite scaled sensitivity' CSS; ranking: 1 = meest gevoelig, 16 = minst gevoelig.	23
Tabel 4.3: Relatieve gevoeligheid S_r van de grondwatertafel t.a.v. K in modellaag X. Rangschikking van de modellen X volgens gevoeligheid op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in modellaag X; ranking: 1 = meest gevoelig, 8 = minst gevoelig.	24
Tabel 4.4: De relatieve gevoeligheid S_r per K-parameterzone, zoals gegeven in onderstaande tabel, is de gemiddelde verandering in grondwatertafel in K-parameterzone Z in modellaag X t.a.v. een verandering in K in modellaag X, en werd berekend op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende parameterzone Z.	25
Tabel 4.5: Relatieve gevoeligheid S_r van de stijghoogte in modellaag X t.a.v. K in modellaag X. Rangschikking van de modellen X volgens gevoeligheid op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in modellaag X; ranking: 1 = meest gevoelig, 8 = minst gevoelig.	26
Tabel 4.6: De relatieve gevoeligheid S_r per K-parameterzone, zoals gegeven in onderstaande tabel, is de gemiddelde verandering in stijghoogte in K-parameterzone Z in modellaag X t.a.v. een verandering in K in modellaag X, en werd berekend op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende parameterzone Z.	27
Tabel 4.7: Relatieve gevoeligheid S_r van de stijghoogte in K-parameterzone Z t.a.v. K in parameterzone Z. Rangschikking van de parameterzones Z volgens gevoeligheid op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende parameterzone Z; ranking: 1 = meest gevoelig, 15 = minst gevoelig.	28
Tabel 4.8: Voor elke K-parameterzone Z werd de gemiddelde verandering in stijghoogte in modellaag X t.a.v. een verandering in K in (enkel) de respectievelijke parameterzone Z bepaald. De berekening is gebaseerd op het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende modellaag X.	30
Tabel 5.1: Overzicht van het aantal observatiepunten per HCOV gebruikt bij de calibratie.	49
Tabel 5.2: Overzicht van het aantal observatiepunten per modellaag gebruikt bij de calibratie.	49
Tabel 5.3: K-parameterzones gerangschikt volgens gevoeligheid op basis van de 'composite scaled sensitivity' CSS; ranking: 1 = meest gevoelig, 20 = minst gevoelig. "N" en "Z" staan respectievelijk voor de relatief noordelijk en zuidelijk gelegen parameterzone.	53
Tabel 5.4: Optimale K-waarden na modelcalibratie. Voor de betekenis van de opdeling van de K-zones HCOV 0230 (modellaag 2 en 3) en HCOV 0250 (modellaag 7 en 8) in een noordelijke "N" en zuidelijke "Z" parameterzone wordt verwezen naar Tabel 5.3.	58
Tabel 5.5: Resultaten modelcalibratie.	62

1 Zie Deelopdracht 1

2 Zie Deelopdracht 1

Opmerking: lichte aanpassing van de modelgrenzen:

De oostrand aan Nederlandse zijde van het modelgebied werd 250 m westwaarts verschoven, overeenkomend met de randen van de rasterbestanden uit de HCOV-kartering. De noordelijke rand van het modelraster werd 100 m zuidwaarts verschoven (cfr. celgrootte: 250x250 m).

In een latere fase (cfr. calibratie, Hoofdstuk 5) werd een bijkomende aanpassing doorgevoerd aan de oostelijke modelrand, ter hoogte van de Maasplassen aan Nederlandse zijde. Gezien de complexe hydrologische situatie in deze regio en het ontbreken van relevante gegevens, en omdat de oorspronkelijke modelrand “arbitrair” is afgebakend (geen fysische grens), werd de modelgrens hier verschoven tot aan het Lateraal Kanaal.

3 Opbouw van het grondwatermodel

3.1 CONCEPTUEEL MODEL

Het modelgebied is vertikaal beperkt tot het Quartair Aquifersysteem (0100) en Kempens Aquifersysteem (0200) en wordt onderaan begrensd door de Boom Aquitard (HCOV 0300). Het modelgebied heeft een horizontale oppervlakte van ca. 1.660 km². In het Vlaams gedeelte van het onderzoeksgebied liggen de randvoorwaarden duidelijk voor de hand. In het oosten wordt het modelgebied begrensd door de Maas, en in het westen wordt de modelgrens gevormd door de waterscheidingslijn tussen Schelde- en Maasbekken. De zuidelijke modelgrens komt overeen met de dagzoom van de Formatie van Boom, echter voor de randvoorwaarde in het bovenliggende grindpakket -dat gewoon doorloopt over deze grens- werd een beroep gedaan op gemeten stijghoogten. De modelgrens aan Nederlandse zijde komt overeen met de rand tot aan waar de HCOV-kartering is uitgevoerd. Omdat hier geen duidelijke fysische grenzen voor handen zijn werd een beroep gedaan op de stijghoogtegegevens als randvoorwaarde.

Gezien de numerieke stabiliteit van het model en de huidige capaciteit van de hardware is het aangewezen om de totale grootte van het model te beperken tot minder dan enkele honderdduizend rekencellen. Hiertoe werden de verschillende lagen bij de verticale indeling van het model in rekenlagen gegroepeerd in relevante HCOV-subeenheden of HCOV-hoofdeenheden. Het resulterende model bestaat uit acht modellagen en heeft een celresolutie van 250 bij 250 m, wat overeenkomt met ca. 350.000 cellen.

Een stationaire ('steady state') grondwatermodellering werd uitgevoerd voor het referentiejaar 2000.

3.2 SOFTWARE

De grondwatermodellering gebeurde 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 (Harbaugh & McDonald, 2000; McDonald & Harbaugh, 1988), bevat enkel het rekenprogramma zonder enige grafische uitvoermogelijkheden. Sinds een aantal jaar worden echter 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 5.1 integreert MODFLOW-2000, MODPATH, FEMWATER, MT3DMS/RT3D, SEAM3D, ART3D, UTCHEM, FEMWATER, PEST, UCODE, MODAEM en SEEP2D.

MODFLOW is wereldwijd één van de meest gebruikte grondwatermodellen. Het is een 3-D eindige verschillen grondwatermodel en is opgebouwd uit afzonderlijke modules die elk een onderdeel van de hydrologische processen (grondwateronttrekkingen, 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 differentiaalvergelijking:

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

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 rekencapaciteit. De vergelijkingen worden iteratief opgelost (Anderson & Woessner, 1992). Verschillende oplossingsmethoden ('solvers') zijn beschikbaar voor de numerieke oplossing van de differentiaalvergelijkingen.

3.3 MODELSTRUCTUUR

3.3.1 Beschrijving van het model

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

X-min. – X-max.: 211.000 – 263.000

Y-min. – Y-max.: 177.000 – 230.000

Het totale modelgebied is 52 bij 53 km of 2.756 km² groot, en is opgebouwd uit 212 rijen en 208 kolommen (resolutie: 250x250 m). Een groot aantal cellen is echter inactief waardoor het effectief te modelleren gebied kleiner is, namelijk 1.657,6 km².

3.3.2 Hydrogeologisch concept

Centraal in het modelgebied situeert zich een zuidoost-noordwest georiënteerde breukzone, waarvan de Feldbissbreuk de belangrijkste is. De Feldbissbreuk verdeelt het onderzoeksgebied in twee grote delen: de Vlake van Bocholt (BE) of Roerdalslenk (NL), ten noorden van de breukzone, en het Kempisch Plateau ten zuiden van de breukzone. Door de breukwerking staan aan weerszijden van de breukzone verschillende hydrogeologische eenheden onder het Quartair in contact met elkaar. Bij het concept voor de lagenopbouw werd vertrokken van het complex gedeelte ten noorden van de Feldbissbreuk. Op basis hiervan werden acht modellagen gedefinieerd, overeenkomend met de hydrogeologische lagenopbouw. De grondkarakteristieken konden hier dus vrij eenvoudig vertaald worden naar de respectievelijke modellagen. Bij de schematisering van de lagenopbouw voor het gedeelte ten zuiden van de Feldbissbreuk werd uitgegaan van deze acht modellagen, die lateraal uitgebreid werden en de karakteristieken van de voorkomende hydrogeologische eenheid ten zuiden van de breukzone kregen.

De hoofdeenheid HCOV 0100 komt in het hele modelgebied voor en vormt de eerste modellaag. Bepaalde lagen die lateraal van elkaar voorkomen, zoals de eenheden HCOV 0214 en HCOV 0242, werden samengenomen in één modellaag, waardoor het niet nodig was om in het deel ten zuiden van de Feldbissbreuk een aparte modellaag te definiëren voor laatstgenoemde eenheid. In het gedeelte ten zuiden van de Feldbissbreuk zijn naast de hoofdeenheid HCOV 0100 en de basiseenheid HCOV 0242 enkel nog de subeenheden HCOV 0230 en 0250 relevant. In het zuidelijk gedeelte wordt de Pleistoceen en Pliocene Aquifer (HCOV 0230) gevormd door modellagen 2, 3 en 4. Het Mioceen Aquifersysteem (HCOV 0250) wordt gevormd door modellagen 6 en 7; de achtste modellaag werd hier overal op inactief gezet. Aangezien de basiseenheden niet gebiedsdekkend voorkomen in de zone ten zuiden van de Feldbissbreuk werden de subeenheden HCOV 0230 en 0250 “arbitrair” opgedeeld in respectievelijk drie en twee lagen van gelijke dikte. Tabel 3.1 en Figuur 3.1 geven het modelconcept voor de lagenopbouw weer.

Tabel 3.1: Modelconcept voor de lagenbouw.

Model- laag	HCOV-eenheid	
	Ten Z van Feldbissbreuk	Ten N van Feldbissbreuk
1	0100: Quartair Aquifersysteem	
2	0230 ^(a) : Pleistoceen en Plioceen Aquifer	0211: Zandige eenheid boven Brunssum I-Klei
3		0212: Brunssum I-Klei
4		0213: Zand van Pey
5	0240: Pliocene kleiige laag	0214: Brunssum II-Klei
6	0250 ^(c) : Mioceen Aquifersysteem	0215: Zand van Waubach
7		0230 ^(b) : Pleistoceen en Plioceen Aquifer
8		0250 ^(c) : Mioceen Aquifersysteem

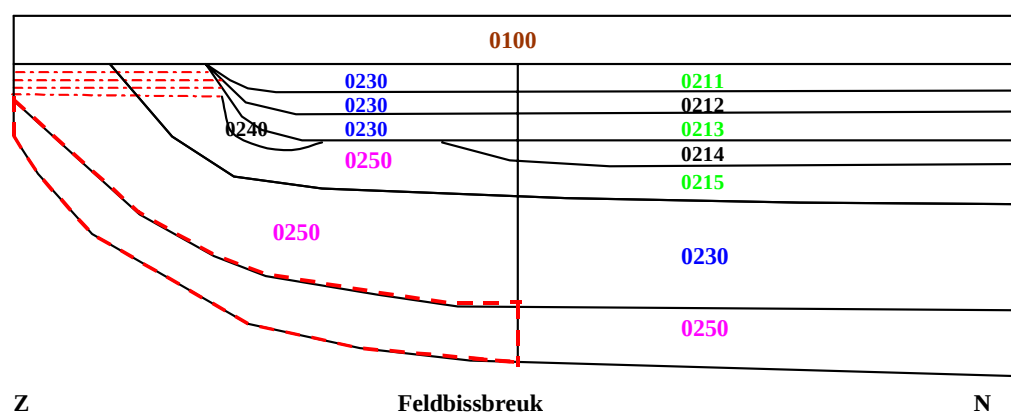
(a): Betreft de basiseenheden HCOV 0232 en 0234.

(b): Betreft (enkel) de basiseenheid HCOV 0234.

(c): Betreft de basiseenheden HCOV 0252, 0253, 0254 en 0256.

Door het voorgestelde lagenconcept wordt het aantal cellen met “nuldikte” zoveel als mogelijk gereduceerd, waardoor de kans op eventuele instabiliteiten in het model tengevolge van droogvallende lagen afneemt. Doordat de aquifers en aquitards niet overal in het onderzoeksgebied volledig overeenkomen met een welbepaalde modellaag zal voor het berekenen van de waterbalans per hydrogeologische eenheid (cfr. Deelopdracht 3) uitgegaan worden van ‘zones’. Op basis hiervan kan elke hydrogeologische eenheid gedefinieerd worden als een zone, waarbij dan voor elke zone een waterbalans kan berekend worden.

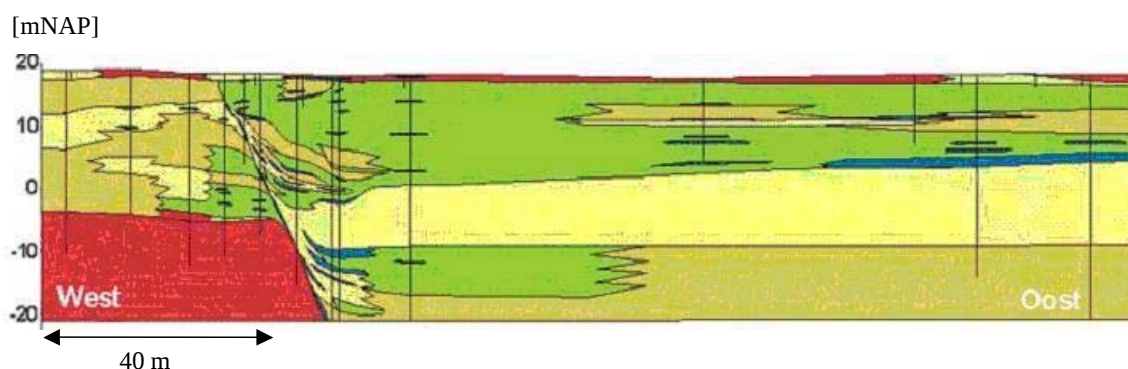
Aan het fenomeen van de uitwiggende lagen (Figuur 3.1) werd tegemoetgekomen door de modellagen te laten doorlopen. Het betreft de modellagen 2, 3 en 4 (HCOV 0230), en 5 (HCOV 0242) ten zuiden van de Feldbissbreuk. Aan deze lagen werd op de betreffende locaties een dikte van 10 cm (standaardwaarde in GMS voor min. laagdikte) toegekend, tesamen met een “oneindige” verticale doorlatendheid K_v (10^4 m/d) en een zeer lage horizontale doorlatendheid K_h (0,0001 m/d); een nulwaarde voor K_h evenals een waarde voor K_v hoger dan 10^4 m/d leidt tot modelinstabiliteit.



Figuur 3.1: Concept voor de opbouw van de modellagen. De rode puntstreeplijnen stellen uitwiggende lagen voor; de rode streeplijn duidt erop dat modellaag 8 ten zuiden van de Feldbissbreuk op “inactief” staat. Elke HCOV-subeenheid heeft een ander kleuropschrift; de HCOV-eenheden met een zwart opschrift zijn slecht doorlatende kleilagen. Voor de benaming van de HCOV-eenheden wordt verwezen naar Tabel 3.1.

Breuken

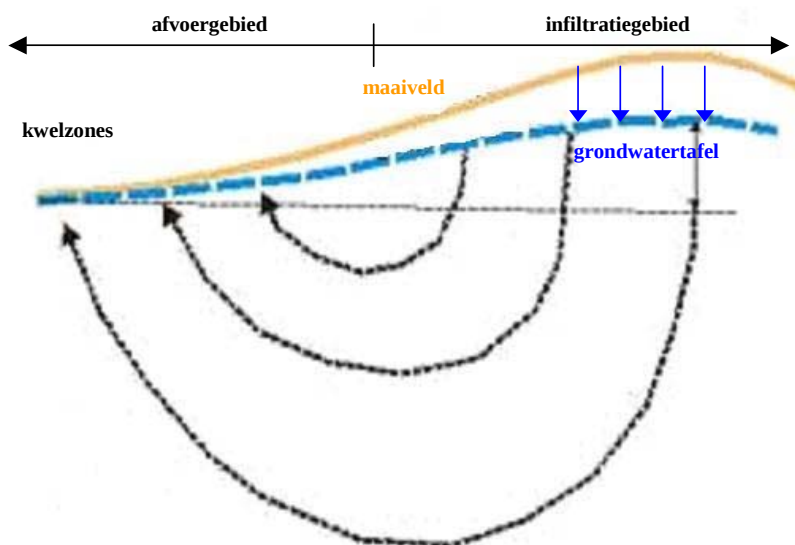
Breukzones kunnen als gevolg van kleiversmering een grote weerstand vormen tegen horizontale stroming terwijl de verticale doorlatendheid zeer hoog kan zijn indien zich zand- of grindlagen tussen de klei bevinden. Uit een hydrogeologisch profiel over een breukzone in de Venlo-slenk in Zuidoost-Nederland (Figuur 3.2) is te zien dat de lagen zand en klei die oorspronkelijk horizontaal zijn gevormd, bij de breuk steil staan. De zachte kleilagen zijn langs de breuk blijven “plakken” en uitgesmeerd in plaats van netjes gebroken, en zorgen ervoor dat het grondwater moeilijker de breuk kan passeren. Het zand buigt niet zoals klei en daardoor vormen zich kleine breukjes. De doorlatendheid van het zand verandert ook door de vervorming (deformatie).



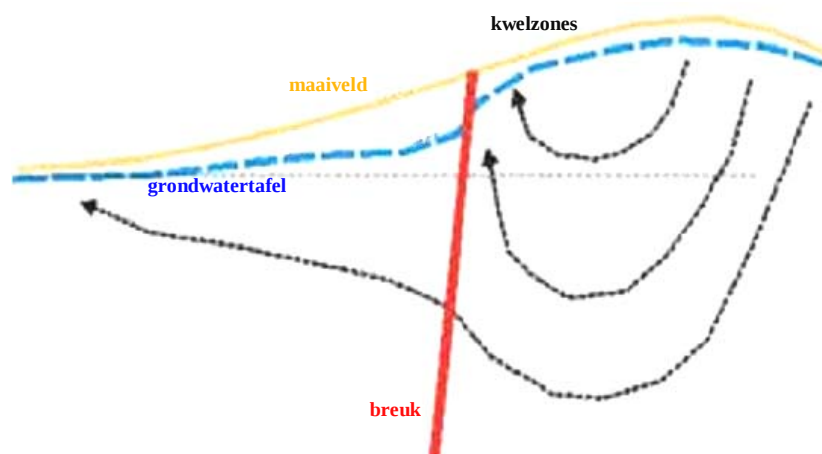
Figuur 3.2: Effect van een breuk op de grondwaterstroming, uit: (Bense, 2002). In groen: zeer grof zand, in donkergeel: grof zand, in lichtgeel: fijn zand, in rood: zeer fijn zand, in blauw: klei.

Normaal wordt aangenomen dat de grondwatertafel in de hoger gelegen gebieden op vrij grote diepte onder het maaiveld staat. Echter, water dat de breuk niet kan passeren wordt omhoog gestuwd en kan op deze manier het ontstaan geven aan kwelzones. Het mogelijk effect van breukwerking op de grondwaterstroming is te zien in Figuur 3.3; figuur A geeft de algemene situatie zonder breuken weer, figuur B toont het effect van breukwerking (Bense, 2002; Bense, 2004).

A.

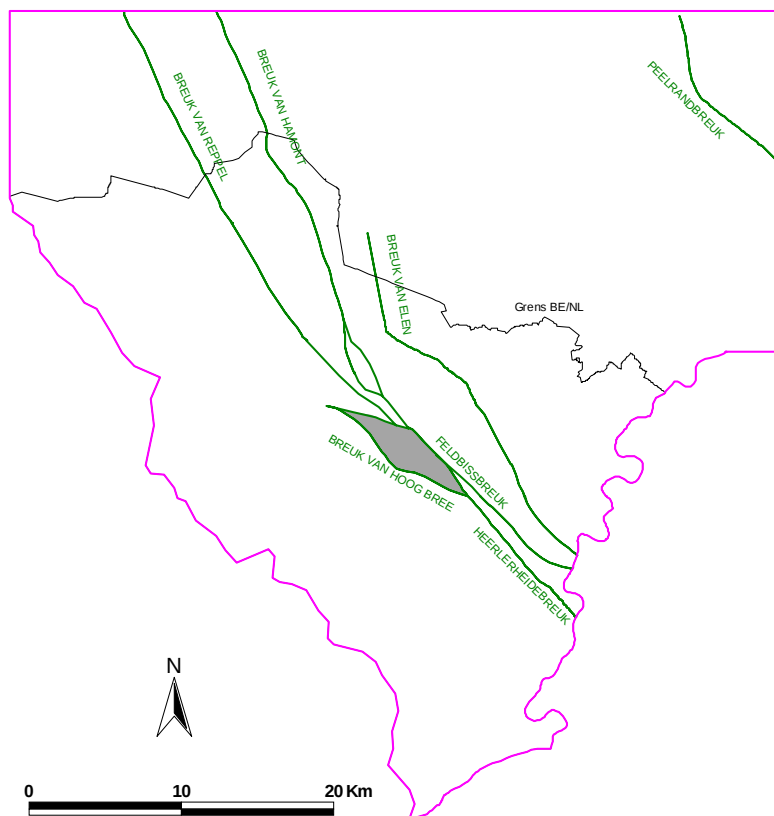


B.



Figuur 3.3: A. Normale situatie: infiltratie op de hoger gelegen delen met een relatief diepe grondwatertafel, en afvoer naar de lager gelegen delen in het landschap, waar de grondwatertafel dichterbij het grondoppervlak staat. B. Effect van een breuk op de grondwaterstroming, uit: (Bense, 2002).

Als gevolg van de breukwerking is het ook mogelijk dat sommige lagen afgesloten worden of kan er “onvoorzien” contact bestaan tussen verschillende lagen. Langs de Feldbissbreuk is er een afzakking van meer dan 400 m in de basis van het Tertiair in noordoostelijke richting, cfr. geologische profielen Deelopdracht 1, Figuren 2.5–2.9. Aan de hiermee gepaard gaande discontinuïteiten in de geologische opbouw werd tegemoetgekomen door het voorgestelde concept van de lagenopbouw, waarbij er langs weerszijden van de Feldbissbreuk contact is tussen verschillende hydrogeologische eenheden, met een verschillende hydraulische doorlatendheid. Uit dwarsprofielen van de modelopbouw blijkt dat ook de breuk van het Hoog van Bree, de Heerlerheidebreuk, de breuk van Hamont, de breuk van Elen en de Peelrandbreuk tot discontinuïteiten in de geologische opbouw leiden (Figuur 3.4). Ter hoogte van de breukzone van het Hoog van Bree en de Feldbissbreuk (Figuur 3.4: grijs ingekleurde zone), ongeveer centraal in het Vlaamse deel van het modelgebied, staat het Mioceen Aquifersysteem (HCOV 0250) door de sterke breukwerking fysisch in contact met het Oligoceen Aquifersysteem (HCOV 0400) en Paleoceen Aquifersysteem (HCOV 1000). Aangenomen wordt echter dat de uitwisseling als gevolg van kleiversmering langs de breuk (HCOV 0300: Boom Aquitard) erg beperkt zal zijn.



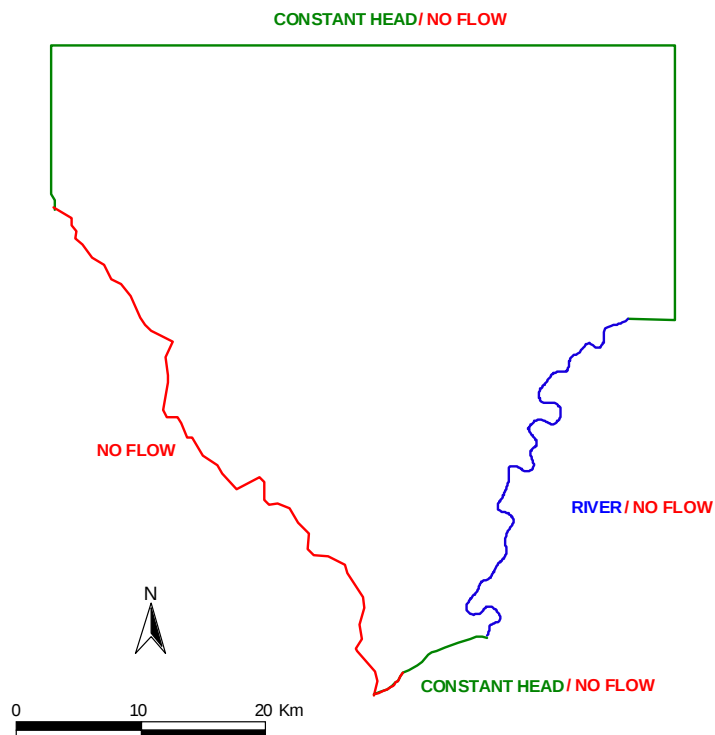
Figuur 3.4: Belangrijke breuken in het model. Ter hoogte van de grijs ingekleurde zone staat het Mioceen Aquifersysteem (HCOV 0250) door de sterke breukwerking in contact

met het Oligoceen Aquifersysteem (HCOV 0400) en Paleoceen Aquifersysteem (HCOV 1000).

De impact van de breukwerking op de grondwaterstroming uit zich in een duidelijk verschil in stijghoogte (cfr. meetgegevens) langs weerszijden van bovengenoemde breuken (Figuur 3.4). De grote verschillen in stijghoogte zijn waarschijnlijk het gevolg van kleiversmering langsheen de breuken, echter concrete gegevens hieromtrent zijn niet bekend. Een manier om aan het effect van de breukwerking en het concept van kleiversmering modelmatig tegemoet te komen bestaat in het implementeren van 'horizontal flow barriers' (HFB-module). Met deze module kan de weerstand tegen horizontale stroming gesimuleerd worden via het definiëren van een soort van vertikaal "scherm" tussen twee naburige cellen, waaraan een hydraulische karakteristiek wordt toegekend die gedefinieerd wordt als "de doorlatendheid gedeeld door de breedte van het scherm". Hierbij wordt aangenomen dat de breedte van het "scherm" verwaarloosbaar klein is in vergelijking met de horizontale celgrootte. Meer uitleg kan teruggevonden worden in Hsieh & Freckleton (1993). De HFB-module heeft het voordeel dat breuken gemodelleerd kunnen worden, zonder dat het nodig is om de rastergrootte te verkleinen en hiermee het aantal modelcellen drastisch te verhogen. Tijdens de modelsimulaties zal blijken in welke mate de waargenomen stijghoogteverschillen langsheen de breuken gereproduceerd worden. Op basis hiervan zal dan duidelijk worden of het gebruik van de HFB-module zich al dan niet opdringt.

3.3.3 Randvoorwaarden aan de rand van het modelgebied (BOUNDARY-conditions)

De waterscheiding tussen Maas- en Scheldebekken vormt de westelijke modelrand en werd gedefinieerd als een ondoorlatende grens ('no flow boundary'). In het oosten vormt de Maas de grens van het model over een lengte van ongeveer 37 km; hier werd een rivier-randvoorwaarde ('river boundary') opgelegd. De onderliggende lagen, onder de Maas, werden als ondoorlatend beschouwd, vermits aangenomen wordt dat het grondwater niet onder de Maas doorstroomt. De zuidelijke modelgrens komt overeen met de dagzoom van de Formatie van Boom, maar het Quartaire grindpakket loopt gewoon over deze grens door. Om deze reden werd in de eerste watervoerende laag een vaste stijghoogte opgelegd als randvoorwaarde ('constant head boundary'); de onderliggende lagen werden als ondoorlatende grens ('no flow boundary') gedefinieerd. Voor de vaste stijghoogte randvoorwaarde werd een beroep gedaan op meetgegevens van peilbuizen in de buurt, waaronder peilbuizen geplaatst in het kader van het proefproject Meers (De Maaswerken, Nederland), dat deel uitmaakt van het project Levende Grensmaas. Aan het eindpunt van de grenslijn (oosten) werd het peil gelijk genomen aan het Maaspeil. GMS interpoleert automatisch (lineair) de stijghoogte tussen de gespecificeerde punten ('nodes') langsheen de grenslijn ('arc').



Figuur 3.5: Randvoorwaarden aan de rand van het modelgebied.

Aan Nederlandse zijde zijn geen duidelijke fysische grenzen voor handen en werd een vaste stijghoogte opgelegd als randvoorwaarde ('constant head boundary'). De stijghoogteresultaten van NAGROM (Nationaal Grondwater Model - Rijkswaterstaat, 1990) vertonen op tal van plaatsen significante verschillen met de meetgegevens van peilbuizen in de buurt. De betreffende modelresultaten van NAGROM hebben weliswaar betrekking op het jaar 1990, echter het wordt niet realistisch geacht dat dit de grote verschillen kan verklaren met de (gemiddelde) meetwaarden voor het jaar 2000. Vooral aan de gemeenschappelijke modelgrens met het Centraal Kempisch Systeem zijn de verschillen erg groot (tot 8 m), maar ook aan de oostzijde van het modelgebied worden verschillen van 2 m genoteerd. Om deze reden werd beslist om de modelresultaten van NAGROM niet te gebruiken en voor de randvoorwaarde aan Nederlandse zijde een beroep te doen op de meetgegevens. Voor de slecht doorlatende eenheden HCOV 0212 (modellaag 3) en HCOV 0214 (modellaag 5), ten noorden van de Feldbissbreuk, werd een ondoorlatende grensvoorwaarde ('no flow boundary') opgelegd.

Figuur 3.5 geeft de randvoorwaarden aan de rand van het modelgebied weer.

Bij de calibratie werd de modelrand in het oosten op Nederlands grondgebied licht gewijzigd. De hiermee samengaannde wijzigingen in randvoorwaarden worden beschreven in hoofdstuk 5 en gevisualiseerd in figuur 5.5.

3.3.4

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 Nederlandse deel werd het Actueel Hoogtebestand Nederland gebruikt (AHN, resolutie: 25x25 m - Rijkswaterstaat Nederland, 2000). Het hoogtebestand vertoonde een lichte verschuiving, waaraan werd verholpen via een 'resampling' met de 'nearest neighbour' optie. Het hoogtebestand diende tevens omgezet te worden van mNAP (Normaal Amsterdams Peil) naar mTAW (Tweede Algemene Waterpassing), i.e. "mTAW = mNAP + 2,32 m". TAW en NAP zijn respectievelijk de referentiehoogten voor België en Nederland, en komen overeen met het gemiddeld laagwaterpeil te Oostende en het gemiddeld zeeniveau te Amsterdam.

Het DHM en het AHN werden vervolgens gekoppeld 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 aan hierboven: (1) 'nearest neighbour resampling' van het digitaal hoogtemodel uit de HCOV-kartering met celresolutie 100x100 m naar een 25x25 m raster, (2) koppeling met het AHN (resolutie 25x25 m), en (3) omzetting naar een raster met resolutie 250x250 m via het berekenen van de gemiddelde waarde per 250x250 m rastercel.

3.4 ANDERE RANDVOORWAARDEN

3.4.1 Hydrografie (RIVER-condities)

De rivieren en kanalen werden in het grondwatermodel opgenomen met behulp van de RIVER-module. Met deze module kan de waterstroming tussen een grondwatervoerende laag en een boven- of onderliggend bronreservoir zoals een rivier, kanaal, meer of plas gesimuleerd worden. Zowel de stroming van als naar het reservoir wordt hierbij beschouwd.

De conductantie $Cond [L^2/T]$ 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:

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

De stroming $Q [L^3/T]$ tussen de waterloop en de aquifer wordt berekend als:

$$Q = Cond(H - h) \quad \text{voor } h > z$$

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

$$Q = Cond(H - z) \quad \text{voor } h \leq z$$

Voor een overzicht van de gebruikte invoergegevens wordt verwezen naar Deelopdracht 1, paragraaf 2.3. Er werd vooraf echter een wijziging doorgevoerd, namelijk voor het traject van de Maas van rivierkilometer 26 tot 56 (Vlaamse zijde) werd voor het waterpeil een beroep gedaan op de verhanglijnen berekend voor een afvoer van 300 m³/s bij een nulscenario, zoals beschreven in de MER Grensmaas 2003 (Royal Haskoning, 2003). De reden voor deze wijziging is dat na Deelopdracht 1 is vastgelegd dat een scenario-analyse dient uitgevoerd te worden (cfr. Deelopdracht 3) waarin het effect van het voorkeursalternatief 2003 van het Nederlandse Grensmaasproject wordt nagegaan, wat enkel mogelijk is indien voor beide situaties (huidige toestand of nulscenario *versus* voorkeursalternatief) vertrokken wordt van eenzelfde afvoer.

3.4.2 Drainage (DRAIN-condities)

Voor de grondwateruitstroming uit het model, in kwelgebieden, kleinere waterlopen, grachten en naar het verbruik door de vegetatie toe, 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:

$$QD = CD(h - d) \quad \text{voor } h > d$$

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

waarbij QD [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 CD [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 2.4, voor meer uitleg over de werking van de DRAIN-module.

Het drainagepeil, dat nodig is als invoer voor GMS, werd bepaald door de drainagediepte af te trekken van de maaiveldhoogte (cfr. paragraaf 3.3.4). Met uitzondering van cellen met al een RIVER- en CONSTANT HEAD-voorwaarde, werd in elke modelcel een DRAIN-voorwaarde opgelegd. In zones waarvoor geen drainageklasse bekend is (kunstmatige bodems, militaire domeinen, veengronden, etc.) werd het drainagepeil op 5 cm onder het maaiveld gezet om de berekening van de grondwaterstand zo min mogelijk te beknotten (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.4). Voor de drainconductantie werd, met uitzondering voor het mijnverzakkingsgebied, een uniforme waarde van $250 \text{ m}^2/\text{d}$ aangenomen.

Naast de grote drinkwaterwinningen situeren de belangrijkste grondwateronttrekkingen zich in het mijnverzakkingsgebied, in de omgeving van Eisden, Leut en Meeswijk. Om de grondwaterstand in de betreffende dorpskernen beneden een veilig niveau onder het maaiveld te houden werden in het gebied pompstations ingericht door de n.v. Mijnen. Een deel van de vereiste ontwateringscapaciteit wordt ook opgevangen door de waterwinningsputten van de Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening (V.M.W.). In de praktijk komt het erop neer dat gepompt wordt tot 2,5 à 3 m onder het maaiveld, om de kelders van de huizen te vrijwaren. Het opgepompte volume varieert dus sterk naargelang droge en natte perioden. Deze onttrekkingen werden als 'drains' ingebracht in het model, met een drainagepeil van 3 m onder het maaiveld en een hoge conductantie; voor de afbakening van het mijnverzakkingsgebied werd een beroep gedaan op de digitale gegevens van

de Vlaamse Hydrologische Atlas (OC GIS-Vlaanderen, 2000). Als startwaarde voor de conductantie in het mijnverzakkingsgebied werd vertrokken van een waarde van 1000 m²/d, i.e. een factor 4 hoger dan elders in het modelgebied. Deze waarde werd tijdens de calibratie aangepast op basis van de berekende waterbalans voor de mijnverzakkingszone en vergelijking met het effectief totaal opgepompte volume in 2000 (ca. 21x10⁶ m³), zie verder Hoofdstuk 5.

3.4.3 Grondwaterwinningen (WELL-condities)

In totaal bevinden zich 3.000 grondwaterwinningen in het modelgebied, waarvan 1.128 aan Vlaamse zijde en 1.872 aan Nederlandse zijde. Het betreft winningen in het Quartair Aquifersysteem (0100) of Kempens Aquifersysteem (0200), met een gemiddeld onttrekkingsdebiet verschillend van nul voor het jaar 2000. De winningen werden in het model ingebracht met behulp van de WELL-module. De winningen werden hierbij toegekend aan de modellaag overeenkomstig de HCOV-laag waaruit gewonnen wordt. Voor de winningen in de subeenheden HCOV 0230 en HCOV 0250, die uit meerdere modellagen zijn opgebouwd, gebeurde de toekenning op basis van de filterdiepte waarbij de filterlengte over de volledige laag werd verondersteld (gegevens omtrent de boven- en onderkant van de filter ontbreken).

Voor de winningen uit de vergunningendatabank, aan Vlaamse zijde, kan een onderscheid gemaakt worden tussen vergund debiet, “effectief onttrokken” debiet en “ingeschat onttrokken” debiet. Slechts 2,3% van het vergunde debiet wordt “ingeschat onttrokken”, 53% wordt “effectief onttrokken”. Indien gekend werd in de modellering met het effectief onttrokken debiet gerekend, in het andere geval werd het ingeschat onttrokken debiet beschouwd (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.6).

Aan Nederlandse zijde van het modelgebied bevinden zich 2.058 winningen vergund door de provincies. Hiervan zijn er echter 211 met een gemiddeld jaarlijks onttrekkingsdebiet gelijk aan nul of onbekend (“-9999”) voor het jaar 2000, wat het totaal voor de modellering terugbrengt tot 1.847. Naast de winningen vergund door de provincies zijn er negen drinkwaterwinningen en 16 andere grote winningen (industrie, bronbemalingen, etc., excl. drinkwaterwinningen) in het Nederlandse deel van het modelgebied.

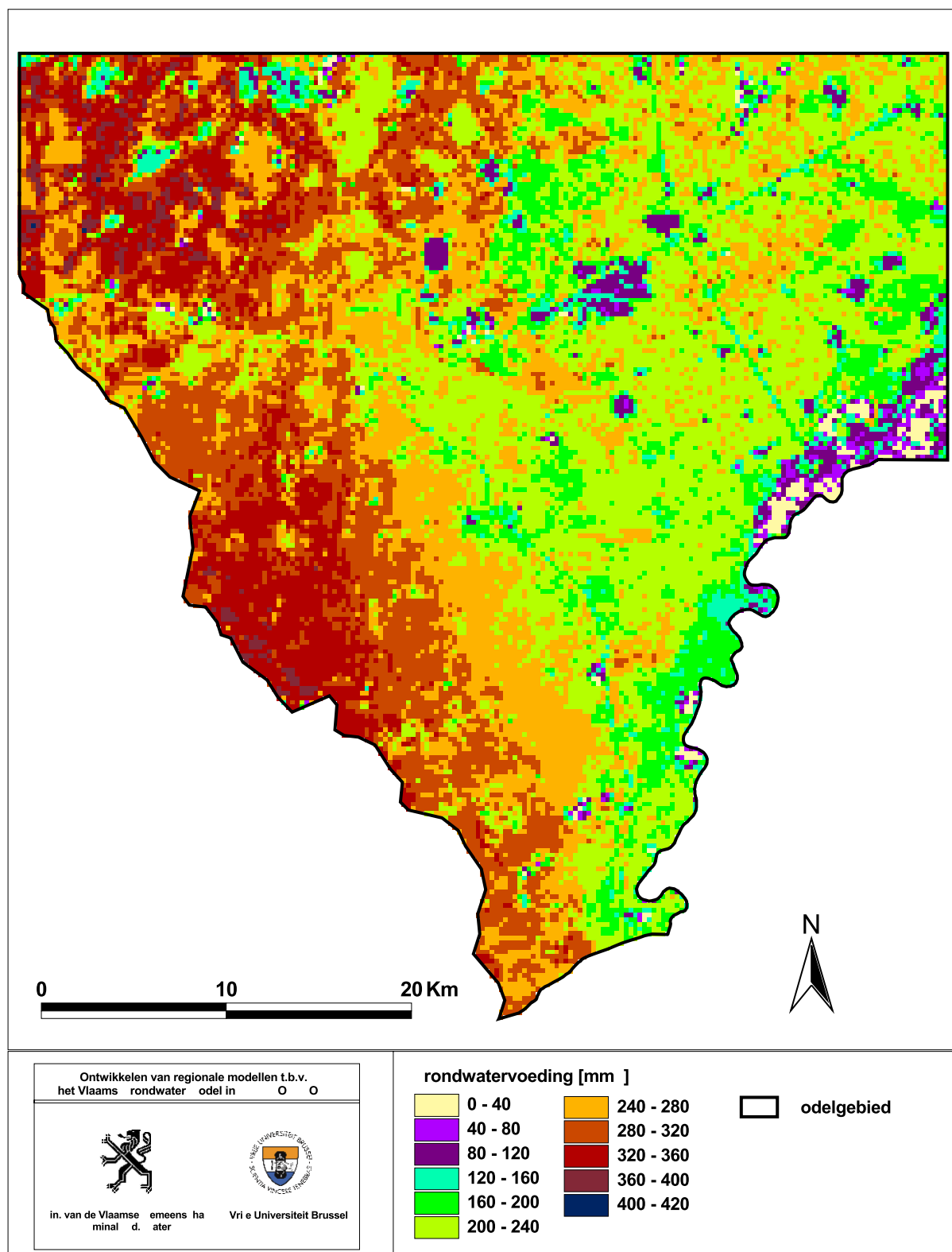
Opmerking: Ter hoogte van vijf grote winningslocaties aan Nederlandse zijde werden aanvankelijk extreem lage waarden in stijghoogte berekend met het model, met op sommige plaatsen droogvallende cellen tot gevolg. Omdat het vermoedelijk installaties betreft bestaande uit meerdere putten werd het debiet daarom verdeeld over een aantal aansluitende cellen (gedetailleerde gegevens op putniveau zijn niet voor handen).

3.4.4 Grondwatervoeding (RECHARGE)

Voor de grondwatervoeding werd een beroep gedaan op de resultaten van het Vlaams Grondwatervoedingsmodel (Meyus et al., 2004). Meyus et al. (2004) berekenden de grondwatervoeding met behulp van 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 als een AVENUE-toepassing geïntegreerd in GIS ArcView, waardoor het zeer efficiënt en gebruiksvriendelijk is.

In het Vlaams Grondwatervoedingsmodel van Meyus et al. (2004) 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 het “originele” raster omgezet naar de gewenste resolutie. Dit gebeurde als volgt: elke modelcel van 250 bij 250 m bevat 25 “originele” cellen van 50 bij 50 m, waarvan het gemiddelde werd berekend.

Figuur 3.6 toont de grondwatervoeding in het modelgebied zoals berekend met WetSpass. De gemiddelde grondwatervoeding voor het volledige modelgebied bedraagt 245 mm/j, en 257 mm/j voor het Vlaamse deel van het modelgebied.



Figuur 3.6: Grondwatervoeding berekend met WetSpa (Meyus et al., 2004) (celresolutie: 250x250 m).

3.5 HYDRAULISCHE PARAMETERS

Voor het toekennen van de hydraulische doorlatendheid werd het modelgebied ingedeeld in 'K-zones', overeenkomend met de verschillende HCOV-eenheden. In de bovenste modellaag, die het Quartair omvat, werden in eerste instantie drie zones onderscheiden. In laag 2 t.e.m. 7 werden aanvankelijk telkens twee zones beschouwd, één ten noorden en één ten zuiden van de Feldbissbreuk. Voor de achtste modellaag (enkel ten noorden van de Feldbissbreuk) werd initieel uitgegaan van één K-zone. Binnen elk van de respectievelijke zones werd de hydraulische doorlatendheid constant verondersteld. Enkel binnen de zone overeenkomend met de Maasvallei (HCOV 0173) werd een interpolatie ('inverse distance weighted') uitgevoerd om de variabiliteit in doorlatendheid van de Maasgrinden in rekening te brengen.

In Tabel 3.2 wordt een overzicht gegeven van de fysische range van hydraulische doorlatendheden of K-waarden per HCOV-eenheid of K-zone, zie ook Deelopdracht 1, paragraaf 2.7. Bij de modellering werd in eerste instantie vertrokken van de gemiddelde K-waarde voor de respectievelijke HCOV-eenheid, berekend op basis van de puntparameters. Het geometrisch gemiddelde werd gebruikt, omdat aangenomen wordt dat het patroon van heterogeniteit random verdeeld is. Voor de eenheden HCOV 0172, 0234 en 0242 zijn voor het Maassysteem en/of het modelgebied geen puntparameters beschikbaar en werd vertrokken van een "arbitraire" K-waarde in het midden van de fysische range. De respectievelijke K-waarden werden tijdens de gevoeligheidsanalyse en calibratie over hun fysische range gevarieerd en geoptimaliseerd (zie verder, Hoofdstuk 4 en 5). De verschillende K-zones in de verschillende modellagen die samen de HCOV-eenheden 0230 en 0250 vormen, werden hierbij als onafhankelijke parameterzones beschouwd. Het onderscheid is gebaseerd op de opbouw en het voorkomen van de respectievelijke HCOV-basiseenheden. Figuur 3.7 toont de initieel onderscheiden parameterzones. Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse en calibratie zal blijken of een verdere differentiatie (bijv. op basis van de HCOV-basiseenheden) van de parameterzones noodzakelijk is.

In de meeste hydrologische modelstudies wordt voor poreuze media een verhouding van de horizontale tot de verticale hydraulische doorlatendheid (K_h/K_v) tussen 1 en 10 aangenomen. Initieel werd vertrokken van een uniforme K_h/K_v -verhouding van 2:1 voor alle K-zones, met uitzondering voor de K-zones HCOV 0212, 0214 en 0242 (kleiig) waarvoor een K_h/K_v -verhouding van 1:1 werd gehanteerd. De K_h/K_v -verhouding werd tijdens de modelcalibratie aangepast (zie verder, Hoofdstuk 5).

Tabel 3.2: Overzicht van de K-zones.

Model- laag	HCOV of K-zone	Omschrijving laag	Geometrisch gemiddelde K ^(a) [m / d]	Fysische range ^(b) [m / d]
1	0171	Afzettingen Hoofdterras	50	20 – 150
	0172	Afzettingen Tussenterras	-	30 – 300
	0173	Afzettingen Maasvlakte: <i>Maasmechelen</i>	367 ^(c)	94 – 1.430
		<i>Eisden</i>	938	452 – 2.333
		<i>Meeswijk</i>	919 ^(d)	647 – 1.304 ^(d)
		<i>Rotem</i>	535 ^(c)	159 – 1.800
		<i>Thorn</i>	150 ^(e)	-
2	0211	Zandige eenheid boven de Brunssum I-Klei	33 ^(c)	10 – 115
	0230	Pleistoceen en Pliocene Aquifer	8,5 ^(f)	5 – 35
3	0212	Brunssum I-Klei	0,001 ^{(c)(g)}	-
	0230	Pleistoceen en Pliocene Aquifer	8,5 ^(f)	5 – 35
4	0213	Zand van Pey	16,5	6 – 38
	0230	Pleistoceen en Pliocene Aquifer	8,5 ^(f)	5 – 35
5	0214	Brunssum II-Klei	0,003	0,001 – 0,01
	0242	Pliocene kleiige laag	-	0,0001 – 0,01
6	0215	Zand van Waubach	38,5	23 – 80
	0250	Mioceen Aquifersysteem	9 ^(h)	0,1 – 40
7	0230 ⁽ⁱ⁾	Pleistoceen en Pliocene Aquifer	-	5 – 7
	0250	Mioceen Aquifersysteem	9 ^(h)	0,1 – 40
8	0250	Mioceen Aquifersysteem	9 ^(h)	0,1 – 40

(a): Het geometrisch gemiddelde werd berekend op basis van de puntwaarden (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.7).

(b): De fysische range heeft betrekking op de maximale range van K-waarden voor de betreffende HCOV-eenheid, i.e. het bereik tussen de min. en max. K-waarde; zowel punt- als regiowaarden werden hierbij in beschouwing genomen (cfr. paragraaf 2.7). Indien < 1 m/d werden de K-waarden afgerond naar één beduidend cijfer, indien > 1 m/d werd afgerond naar een geheel getal. Voor de eenheden HCOV 0172, 0234 en 0242 zijn geen puntwaarden voor handen voor het Maassysteem en/of modelgebied; de fysische range is hier uitsluitend gebaseerd op regiowaarden.

(c): Betreft “gewoon gemiddelde” zoals gegeven in Viaene et al. (1997).

(d): De extreme K_n-waarde ('outlier') van 6.047 m/d (cfr. paragraaf 2.7, Tabel 2.19) werd buiten beschouwing gelaten.

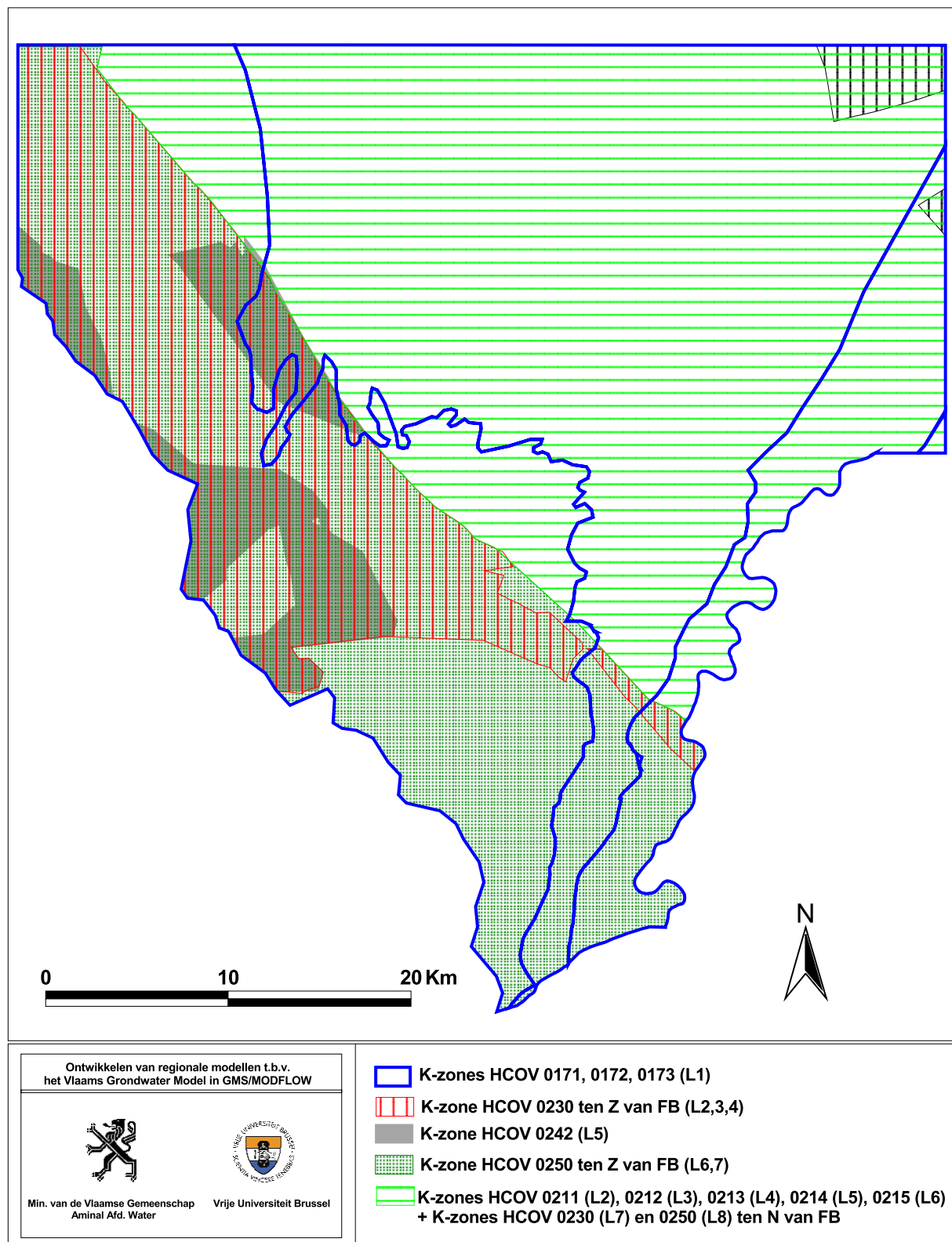
(e): Betreft één afzonderlijke puntwaarde, de fysische range is niet bekend.

(f): Betreft het gemiddelde van de basiseenheden HCOV 0232 en 0234, waarbij een K-waarde van 6 m/d aangenomen werd voor de eenheid HCOV 0234 (bepaald op basis van de regiowaarden, want geen puntparameters beschikbaar voor Maassysteem en/of modelgebied). In een eerste fase werd geen verder onderscheid gemaakt op basis van het voorkomen van de respectievelijke HCOV-basiseenheden.

(g): Geen informatie omtrent de fysische range bekend.

(h): Betreft het gemiddelde van de HCOV-basiseenheden 0252, 0253, 0254 en 0256. Extreme waarden of 'outliers' (bijv. voor HCOV 0253: $K_h = 101,5$ m/d en $K_h = 104,5$ m/d; cfr. paragraaf 2.7, Tabel 2.19) werden buiten beschouwing gelaten. In een eerste fase werd geen verder onderscheid gemaakt op basis van het voorkomen van de respectievelijke HCOV-basiseenheden.

(i): Betreft (enkel) de basiseenheid HCOV 0234.



Figuur 3.7: Onderscheiden K-zones in het model. De K-zone HCOV 0213 komt overeen met het groen gearceerde deel *minus* het zwart gearceerde deel in het uiterste noordoosten van het modelgebied.

4 Gevoeligheidsanalyse

De calibratie 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 modelcalibratie te beginnen. De parameterwaarden van de hydraulische doorlatendheid, de grondwatervoeding, de vaste stijghoogte grensvoorwaarden, het volume gewonnen grondwater, de drainageweerstand en de rivier- en kanaalconductanties werden hierbij achtereenvolgens over hun fysische range gevarieerd. De grootte van de verandering in stijghoogte is een maat voor de gevoeligheid van de modeloplossing 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 onderzocht.

Verschillende grootheden kunnen gebruikt worden om de gevoeligheid van de modeloplossing t.a.v. een verandering in de modelparameters na te gaan. 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:

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

waarbij h_i/p_j de gevoeligheid is van de i^{de} gesimuleerde stijghoogte h t.a.v. de j^{de} parameter p , ω_i het gewicht van de i^{de} observatie, en N het aantal observatiepunten. Een hogere waarde voor CSS duidt op een grotere gevoeligheid van de gesimuleerde stijghoogte t.a.v. de betreffende parameter. De CSS geeft aan in hoeverre de betreffende parameter kan geschat worden op basis van de beschikbare meetgegevens. Een automatische gevoeligheidsanalyse werd uitgevoerd voor de verschillende K-parameterzones. Voor de berekening van CSS werden in elk van de lagen 1 t.e.m. 7, 24 dezelfde "puntlocaties" regelmatig verdeeld over het modelraster geselecteerd; voor laag 8 betreft het slechts 15 puntlocaties omdat het gedeelte ten zuiden van de Feldbissbreuk "inactief" is. In totaal werden aldus 183 puntlocaties beschouwd. De gevoeligheid t.a.v. de overige modelparameters (grondwatervoeding, opgepompt volume, etc.) kon niet nagegaan worden met behulp van de automatische gevoeligheidsanalyse in GMS, aangezien deze parameters ruimtelijk gedistribueerd zijn.

Tabel 4.1: Gemiddelde waarde (referentie) en fysische range voor de hydraulische doorlatendheid per HCOV of K-zone, tesamen met de factoren waarmee K tijdens de gevoeligheidsanalyse gevarieerd werd t.o.v. de referentiewaarde.

Modellaag	HCOV of K-zone	Referentie K-waarde [m/d]	Fysische range [m/d]	Ref./min. waarde [-]	Max./ref. waarde [-]
1	0171	50	20 – 150	2,5	3
	0172	100	30 – 300	3,3	3
	0173	150 ^(a) - 938	35 – 2.333	4	2,5
2	0211	33	10 – 115	3,3	3,5
	0230	8,5	5 – 35	1,7	4,1
3	0212	0,001	0,0001 – 0,01 ^(b)	10	10
	0230	8,5	5 – 35	1,7	4,1
4	0213	16,5	6 – 38	2,7	2,3
	0230	8,5	5 – 35	1,7	4,1
5	0214	0,003	0,001 – 0,01	3	3,7
	0242	0,005	0,0001 – 0,01	50	2
6	0215	38,5	23 – 80	1,7	2,1
	0250	9	3 ^(c) – 40	3	4,4
7	0230	6	5 – 7	1,2	1,2
	0250	9	3 ^(c) – 40	3	4,4
8	0250	9	3 ^(c) – 40	3	4,4

(a): De K-waarde van 150 m/d betreft één individuele puntwaarneming (t.h.v. Thorn); aangenomen werd dat de betreffende puntwaarde in het midden van de fysische range ligt en er werd over een factor 4 gevarieerd (i.e. $K_{\min}$: 35 m/d).

(b): Wegens een gebrek aan gegevens werd arbitrair over een factor 10 gevarieerd.

(c): De modeloplossing wordt instabiel indien gerekend wordt met een $K_{\min}$ -waarde van 0,1 m/d (cfr. Tabel 3.2). Laatstgenoemde waarde heeft betrekking op de basiseenheid HCOV 0254 en is - hoewel geen concrete gegevens beschikbaar- wellicht ook relevant voor de kleiige basiseenheid HCOV 0256. Een hogere $K_{\min}$ lijkt echter relevanter indien de globale subeenheid HCOV 0250 beschouwd wordt (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.7). Een waarde van 3 m/d werd als dusdanig gehanteerd voor $K_{\min}$.

De gevoeligheid t.a.v. de ruimtelijk gedistribueerde parameters werd nagegaan op basis van de relatieve gevoeligheid S_r . De gevoeligheid t.a.v. de verschillende K-zones berekend op basis van CSS geeft een soort van “uitgemiddelde” gevoeligheid over de verschillende modellen weer. De specifieke gevoeligheid van de stijghoogte t.a.v. K, per modellaag en per K-zone, werd tevens nagegaan op basis van S_r . Het principe komt hierop neer: indien de beschouwde parameter P met

een kleine waarde ($P + \delta P$) gevarieerd wordt, zal dit leiden tot een kleine verandering ($h + \delta h$) in de berekende stijghoogte h , en de relatieve gevoeligheid S_r kan dan als volgt berekend worden:

$$S_r = \frac{\partial h / h}{\partial P / P}$$

M.a.w., de relatieve gevoeligheid S_r is de verhouding van het relatief verschil in berekende stijghoogte en parameterwaarde. Een lage gevoeligheid geeft aan dat de onzekerheid in de waarde van de betreffende parameter weinig doorweegt op de modelresultaten. Algemeen wordt gesteld dat indien $S_r > 1$ de onzekerheid vergroot en grote fouten kunnen 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 puntlocaties (183 in totaal) als bij de berekening van CSS.

Het effect op de ruimtelijke veranderingen in stijghoogte kan weergegeven worden met behulp van gevoeligheidskaarten, cfr. Figuren 4.2-4.12. 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 $h_{\text{referentie}}$. Het model dat gebruikt werd als “referentie” betreft een convergerend model met een fout van 0,00% op de waterbalans. Als “referentie” werd vertrokken van de gemiddelde K-waarden voor elke K-zone (Tabel 4.1).

4.1 HYDRAULISCHE DOORLATENDHEID

‘Composite scaled sensitivities’ van K-parameterzones

Een automatische gevoeligheidsanalyse in GMS werd uitgevoerd, waarbij de gevoeligheid t.a.v. de verschillende K-parameterzones werd nagegaan op basis van de ‘composite scaled sensitivity’ CSS. De drie K-zones overeenkomend met de subeenheid HCOV 0250 (modellaag 6, 7 en 8) werden hierbij als drie aparte parameterzones beschouwd. Hetzelfde geldt voor de vier K-zones overeenkomend met de eenheid HCOV 0230 (modellaag 2, 3, 4 en 7), die als vier aparte parameterzones werden beschouwd. In totaal werden aldus 16 K-parameterzones beschouwd. Als startwaarde voor K werd vertrokken van de gemiddelde waarden voor de respectievelijke K-zones (cfr. Tabel 4.1). Tabel 4.2 geeft een overzicht van de K-parameterzones gerangschikt volgens gevoeligheid op basis van CSS.

Uit Tabel 4.2 blijkt, zoals verwacht, dat de modelresultaten zeer weinig gevoelig zijn t.a.v. de K-zones HCOV 0212, 0214 en 0242 (kleinig). De twee K-parameterzones HCOV 0250 ten zuiden van

de Feldbissbreuk (modellaag 6 en 7) zijn duidelijk het meest gevoelig. Hoewel beduidend minder dan de twee K-zones HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk, blijkt in het gedeelte ten noorden van de Feldbissbreuk de K-zone HCOV 0211 het meest gevoelig te zijn.

Tabel 4.2: K-parameterzones gerangschikt volgens gevoeligheid op basis van de 'composite scaled sensitivity' CSS; ranking: 1 = meest gevoelig, 16 = minst gevoelig.

Ranking	K-parameterzone	CSS [-]
1	HCOV 0250 (L7)	1,01
2	HCOV 0250 (L6)	0,82
3	HCOV 0211	0,49
4	HCOV 0172	0,46
5	HCOV 0173	0,20
6	HCOV 0171	0,092
7	HCOV 0250 (L8)	0,083
8	HCOV 0230 (L4)	0,057
9	HCOV 0230 (L3)	0,057
10	HCOV 0230 (L2)	0,054
11	HCOV 0215	0,040
12	HCOV 0213	0,035
13	HCOV 0230 (L7)	0,011
14	HCOV 0212	0,52E-05
15	HCOV 0242	0,49E-05
16	HCOV 0214	0,32E-05

Relatieve gevoeligheid van de grondwatertafel t.a.v. K in modellaag X

De gevoeligheid van de grondwatertafel t.a.v. een verandering in K in de respectievelijke model-lagen X/ K-zones Z werd berekend op basis van de relatieve gevoeligheid S_r . Als "referentie" voor K werd vertrokken van de gemiddelde waarde voor de respectievelijke K-zone (cfr. Tabel 4.1), die dan binnen zijn fysische range gevarieerd werd. Tabel 4.1 geeft de factoren weer waarmee de initiële K-waarden (referentiewaarden) gevarieerd werden tussen hun minimum en maximum. De K_h/K_v -verhouding werd onveranderlijk gelaten tijdens de gevoeligheidsanalyse (i.e. 1:1 voor kleine K-zones 0212, 0214 en 0242, 2:1 voor overige K-zones). Voor elk van de geselecteerde puntlocaties (L1,6,7: #24; L2,3,4: #21; L5,8: #15, cfr. uitwiggende lagen) werd de verandering in grondwatertafel berekend voor een verandering van $K_{\text{referentie}}$ in modellaag X t.o.v. respectievelijk zijn min. en max. hierbij rekening houdend met de verdeling van de puntlocaties over de verschillende K-parameterzones. Vervolgens werd voor de beide scenarios (t.a.v. K_{min} en K_{max}) het gemiddelde van de individuele relatieve gevoeligheden van alle puntlocaties in de betreffende

modellaag berekend. De relatieve gevoeligheid per modellaag werd uiteindelijk bepaald als het gemiddelde van voorgaande twee waarden (voor de twee scenarios). Tabel 4.3 geeft een overzicht van de resultaten. Tabel 4.4 geeft ook de relatieve gevoeligheid per K-parameterzone, i.e. de verandering in grondwatertafel in K-parameterzone Z in modellaag X t.a.v. een verandering in K in modellaag X. Laatsgenoemde werd analoog berekend als hiervoor, met name op basis van het gemiddelde van de individuele relatieve gevoeligheden van alle puntlocaties in de betreffende parameterzone Z, waarbij dan het gemiddelde van de twee waarden voor de beide scenarios (t.a.v. $K_{\min}$ en $K_{\max}$) werd genomen.

Tabel 4.3: Relatieve gevoeligheid S_r van de grondwatertafel t.a.v. K in modellaag X. Rangschikking van de modellen X volgens gevoeligheid op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in modellaag X; ranking: 1 = meest gevoelig, 8 = minst gevoelig.

Ranking	Modellaag	HCOV of K-zone	Gemidd. S_r [-] modellaag ^(a)
1	L1	0171	0,48
		0172	
		0173	
2	L7	0230	0,47
		0250	
3	L2	0211	0,41
		0230	
4	L6	0215	0,28
		0250	
5	L5	0214	0,04 ^(b)
		0242 ^(b)	
6	L4	0213	0,04
		0230	
7	L8	0250	0,04
8	L3	0212	0,03
		0230	

(a): De berekening van S_r voor modellaag 2, 3 en 4 is gebaseerd op 21 i.p.v. 24 puntlocaties, en voor modellaag 5 op 15 puntlocaties (cfr. uitwiggende lagen). Modellaag 8 telt 15 puntlocaties.

(b): Geen puntlocaties aanwezig in de K-zone HCOV 0242; de S_r voor modellaag 5 werd gelijk genomen aan de S_r voor de K-zone HCOV 0214.

Tabel 4.4: De relatieve gevoeligheid S_r per K-parameterzone, zoals gegeven in onderstaande tabel, is de gemiddelde verandering in grondwatertafel in K-parameterzone Z in modellaag X t.a.v. een verandering in K in modellaag X, en werd berekend op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende parameterzone Z.

Modellaag	HCOV of K-zone	Gemidd. S_r [-] K-parameterzone
L1	0171	0,22
	0172	0,56
	0173	0,93
L2	0211	0,49
	0230	0,23
L3	0212	0,01
	0230	0,09
L4	0213	0,01
	0230	0,11
L5	0214	0,04
	0242 ^(a)	-
L6	0215	0,04
	0250	0,68
L7	0230	0,27
	0250	0,82
L8	0250	0,04

(a): Geen puntlocaties aanwezig in de K-zone HCOV 0242.

Uit de resultaten (Tabellen 4.3 en 4.4) blijkt, zoals verwacht, dat de grondwatertafel vooral gevoelig is aan veranderingen in K in modellaag 1 en 7. Vooral in de respectievelijke eenheden HCOV 0173 (~ Maasvallei) en HCOV 0250 is de invloed van een verandering in K (in de hele laag) op de grondwatertafel significant. In de eenheid HCOV 0171 (~ Kempisch Plateau) is de invloed aanzienlijk lager daar de grondwatertafel hier over grote delen onder de basis van het Quartair staat. Dat de grondwatertafel erg gevoelig is aan veranderingen in K in de eenheid HCOV 0250 in modellaag 6 en 7 kan verklaard worden doordat er in het deel ten zuiden van de Feldbissbreuk geen (volledig) afsluitende kleilagen zijn en de eenheid HCOV 0230 niet gebiedsdekkend voorkomt. Ten noorden van de Feldbissbreuk is de gevoeligheid van de grondwatertafel t.a.v. K in de eenheden onder en inclusief de Brunssum I-Klei (HCOV 0212) zeer gering.

Relatieve gevoeligheid van de stijghoogte in modellaag X t.a.v. K in modellaag X

De onderlinge gevoeligheid van de stijghoogte t.a.v. K in de respectievelijke modellen werd analoog als hiervoor berekend. Voor iedere modellaag werd in elk van de geselecteerde puntlocaties (L1,6,7: #24; L2,3,4: #21; L5,8: #15, cfr. uitwiggende lagen) de verandering in stijghoogte berekend voor een verandering van $K_{\text{referentie}}$ t.o.v. respectievelijk zijn min. en max. (cfr. Tabel 4.1), hierbij rekening houdend met de verdeling van de puntlocaties over de verschillende K-parameterzones. Vervolgens werd voor de beide scenarios (t.a.v. K_{min} en K_{max}) het gemiddelde van de individuele relatieve gevoeligheden van alle puntlocaties in de betreffende modellaag berekend. De relatieve gevoeligheid per modellaag werd uiteindelijk bepaald als het gemiddelde van voorgaande twee waarden (voor de twee scenarios). Tabel 4.5 geeft een overzicht.

Tabel 4.5: Relatieve gevoeligheid S_r van de stijghoogte in modellaag X t.a.v. K in modellaag X. Rangschikking van de modellen X volgens gevoeligheid op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in modellaag X; ranking: 1 = meest gevoelig, 8 = minst gevoelig.

Ranking	Modellaag	HCOV of K-zone	Gemidd. S_r [-] modellaag ^(a)
1	L7	0230	3,68
		0250	
2	L8	0250	1,19
3	L4	0213	0,98
		0230	
4	L6	0215	0,83
		0250	
5	L5	0214	0,73 ^(b)
		0242 ^(b)	
6	L1	0171	0,48
		0172	
		0173	
7	L2	0211	0,41
		0230	
8	L3	0212	0,11
		0230	

(a): De berekening van S_r voor modellaag 2, 3 en 4 is gebaseerd op 21 i.p.v. 24 puntlocaties, en voor modellaag 5 op 15 puntlocaties (cfr. uitwiggende lagen). Modellaag 8 telt 15 puntlocaties.

(b): Geen puntlocaties aanwezig in de K-zone HCOV 0242; de S_r voor modellaag 5 werd gelijk genomen aan de S_r voor de K-zone HCOV 0214.

Uit de resultaten in Tabel 4.5 kan afgeleid worden dat vooral de stijghoogte in modellaag 7 gevoelig is aan veranderingen in K (in de betreffende laag); modellaag 3 kent de laagste gevoeligheid. Figuren 4.2 en 4.3 en Figuren 4.4 en 4.5 tonen de gevoeligheidskaarten voor respectievelijk modellaag 3 en 7. Het valt op dat de diepste lagen (L7 en L8) gekenmerkt worden door de hoogste gevoeligheid, en dat de toplagen (L1, L2 en L3) de laagste gevoeligheid kennen t.a.v. K.

Tabel 4.6 geeft ook de relatieve gevoeligheid per K-parameterzone, i.e. de verandering in stijghoogte in K-parameterzone Z in modellaag X t.a.v. een verandering in K in modellaag X. Laatsgenoemde werd analoog berekend als hiervoor, met name op basis van het gemiddelde van de individuele relatieve gevoeligheden van alle puntlocaties in de betreffende parameterzone Z, waarbij dan het gemiddelde van de twee waarden voor de beide scenarios (t.a.v. $K_{\min}$ en $K_{\max}$) genomen werd.

Tabel 4.6: De relatieve gevoeligheid S_r per K-parameterzone, zoals gegeven in onderstaande tabel, is de gemiddelde verandering in stijghoogte in K-parameterzone Z in modellaag X t.a.v. een verandering in K in modellaag X, en werd berekend op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende parameterzone Z.

Modellaag	HCOV of K-zone	Gemidd. S_r [-] K-parameterzone
L1	0171	0,22
	0172	0,56
	0173	0,93
L2	0211	0,48
	0230	0,23
L3	0212	0,12
	0230	0,08
L4	0213	1,33
	0230	0,10
L5	0214	0,73
	0242 ^(a)	-
L6	0215	0,93
	0250	0,67
L7	0230	5,39
	0250	0,83
L8	0250	1,19

(a): Geen puntlocaties aanwezig in de K-zone HCOV 0242.

De individuele S_r van de verschillende K-zones (Tabel 4.6) verschillen vrij sterk van CSS (Tabel 4.2). Een mogelijke verklaring hiervoor is dat voor sommige K-zones een verandering in K zich quasi uitsluitend in de zone zelf manifesteert, terwijl voor andere K-zones de verandering in stijghoogte in de zone zelf veelal niet zeer groot is maar dat de globale invloed, op de andere K-zones of modellen, groter is. Beschouwen we bij wijze van voorbeeld modellaag 7. Uitgaande van de gemiddelde S_r blijkt dat modellaag 7 het gevoeligst t.a.v. een verandering in K, en uit de individuele S_r per parameterzone valt de erg hoge S_r op voor de K-zone HCOV 0230, die hoger is dan de S_r -waarde voor de K-zone HCOV 0250. Op basis van de CSS komt de K-zone 0250 in laag 7 als meest gevoelige parameterzone naar voor, terwijl de gevoeligheid t.a.v. de K-zone HCOV 0230 in laag 7 erg laag is. Doordat de berekeningswijze gebaseerd is op de gemiddelde verandering in stijghoogte in één bepaalde K-parameterzone t.a.v. een verandering in K in de globale modellaag, is het mogelijk dat de verandering in stijghoogte in de betreffende K-parameterzone veeleer te wijten is aan een verandering in K in de andere K-parameterzone. Gezien bovendien de relatieve verandering in K in de eenheid HCOV 0230 erg klein is (zeer nauwe fysische range: $K_{\min}$ en $K_{\max}$ resp. 5 en 7 m/d) weegt een verandering in stijghoogte in de K-zone 0230 zeer sterk door bij de berekening van S_r .

Relatieve gevoeligheid van de stijghoogte in K-parameterzone Z t.a.v. K in parameterzone Z

Omwillen van voorgaande werd de gevoeligheid van de verschillende K-parameterzones nagegaan voor het scenario waarbij K enkel in de betreffende parameterzone gevarieerd werd. De berekening gebeurde analoog als hiervoor, met name op basis van het gemiddelde van de individuele relatieve gevoeligheden van alle puntlocaties in de betreffende parameterzone Z, waarbij dan het gemiddelde van de twee waarden voor de beide scenarios (t.a.v. $K_{\min}$ en $K_{\max}$) genomen werd. Tabel 4.7 geeft een overzicht van de resultaten.

De K-zone 0213 en de K-zones 0250 worden gekenmerkt door een hoge gevoeligheid. De K-zones 0230 ten zuiden van de Feldbissbreuk tonen een erg lage gevoeligheid. In vergelijking met voorgaande analyse (cfr. Tabellen 4.5 en 4.6) komen over het algemeen dezelfde trends naar voor, wat aangeeft dat de stijghoogte in een bepaalde K-zone voornamelijk beïnvloed wordt door een verandering in K in de zone zelf. De K-zone 0230 in laag 7 vormt hierop een uitzondering, wat betekent dat de stijghoogte in deze zone vooral van buitenaf beïnvloed wordt (*in casu* door een verandering in de K-zone 0250, zie ook hierboven).

Tabel 4.7: Relatieve gevoeligheid S_r van de stijghoogte in K-parameterzone Z t.a.v. K in parameterzone Z. Rangschikking van de parameterzones Z volgens gevoeligheid op basis van het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende parameterzone Z; ranking: 1 = meest gevoelig, 15 = minst gevoelig.

Ranking	HCOV of K-zone ^(a)	Gemidd. S_r [-] K-parameterzone
1	0213	1,24
2	0250 L8	1,18
3	0173	0,88
4	0250 L7	0,82
5	0214	0,72
6	0250 L6	0,68
7	0215	0,59
8	0172	0,55
9	0211	0,49
10	0171	0,15
11	0230 L7	0,14
12	0212	0,11
13	0230 L2	0,10
14	0230 L4	0,09
15	0230 L3	0,08

(a): De K-zone HCOV 0242 ontbreekt omdat hier geen puntlocaties aanwezig zijn.

Finaal werd voor elke parameterzone afzonderlijk de invloed van een verandering in K (in de betreffende zone) op de globale stijghoogte in de respectievelijke modellaag nagegaan. De berekening gebeurde eveneens analoog als hiervoor op basis van het gemiddelde van de individuele relatieve gevoeligheden van alle puntlocaties in de respectievelijke modellaag X -hierbij rekening houdend met de verdeling van de puntlocaties over de verschillende K-parameterzones Z- waarbij dan het gemiddelde van de twee waarden voor de beide scenarios (t.a.v. $K_{\min}$ en $K_{\max}$) genomen werd. Tabel 4.8 geeft een overzicht van de resultaten.

Tabel 4.8: Voor elke K-parameterzone Z werd de gemiddelde verandering in stijghoogte in modellaag X t.a.v. een verandering in K in (enkel) de respectievelijke parameterzone Z bepaald. De berekening is gebaseerd op het gemiddelde van de individuele S_r van alle gedefinieerde puntlocaties in de betreffende modellaag X.

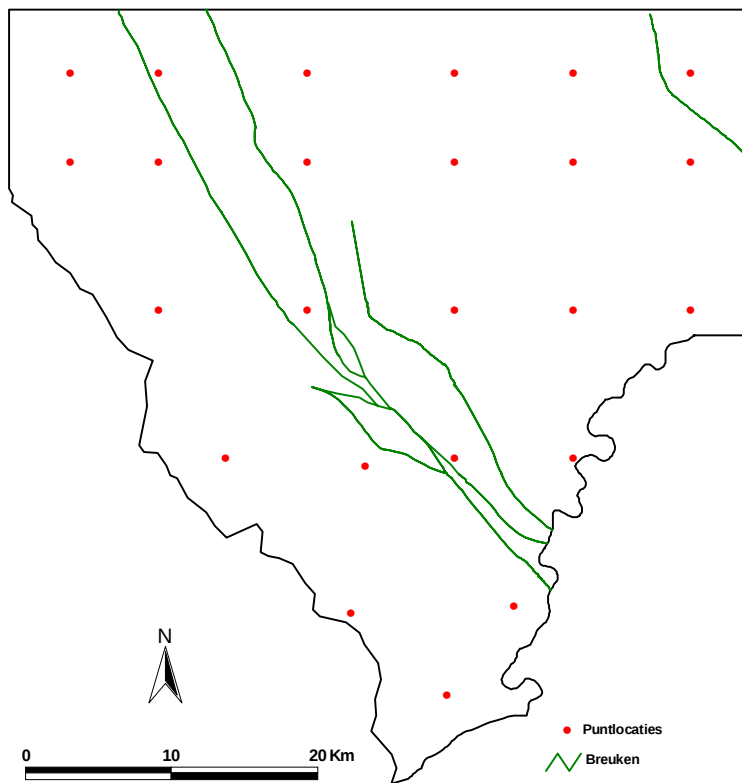
Modellaag	HCOV of K-zone	Gemidd. S_r [-] modellaag ^(a)
L1	0171	0,06
	0172	0,37
	0173	0,12
L2	0211	0,38
	0230	0,04
L3	0212	0,08
	0230	0,05
L4	0213	0,89
	0230	0,14
L5	0214	0,70 ^(b)
	0242	0,01 ^(c)
L6	0215	0,37
	0250	0,83
L7	0230	0,09
	0250	0,85
L8	0250	1,19

(a): De berekening van S_r voor modellaag 2, 3 en 4 is gebaseerd op 21 i.p.v. 24 puntlocaties, en voor modellaag 5 op 15 puntlocaties (cfr. uitwiggende lagen). Modellaag 8 telt 15 puntlocaties.

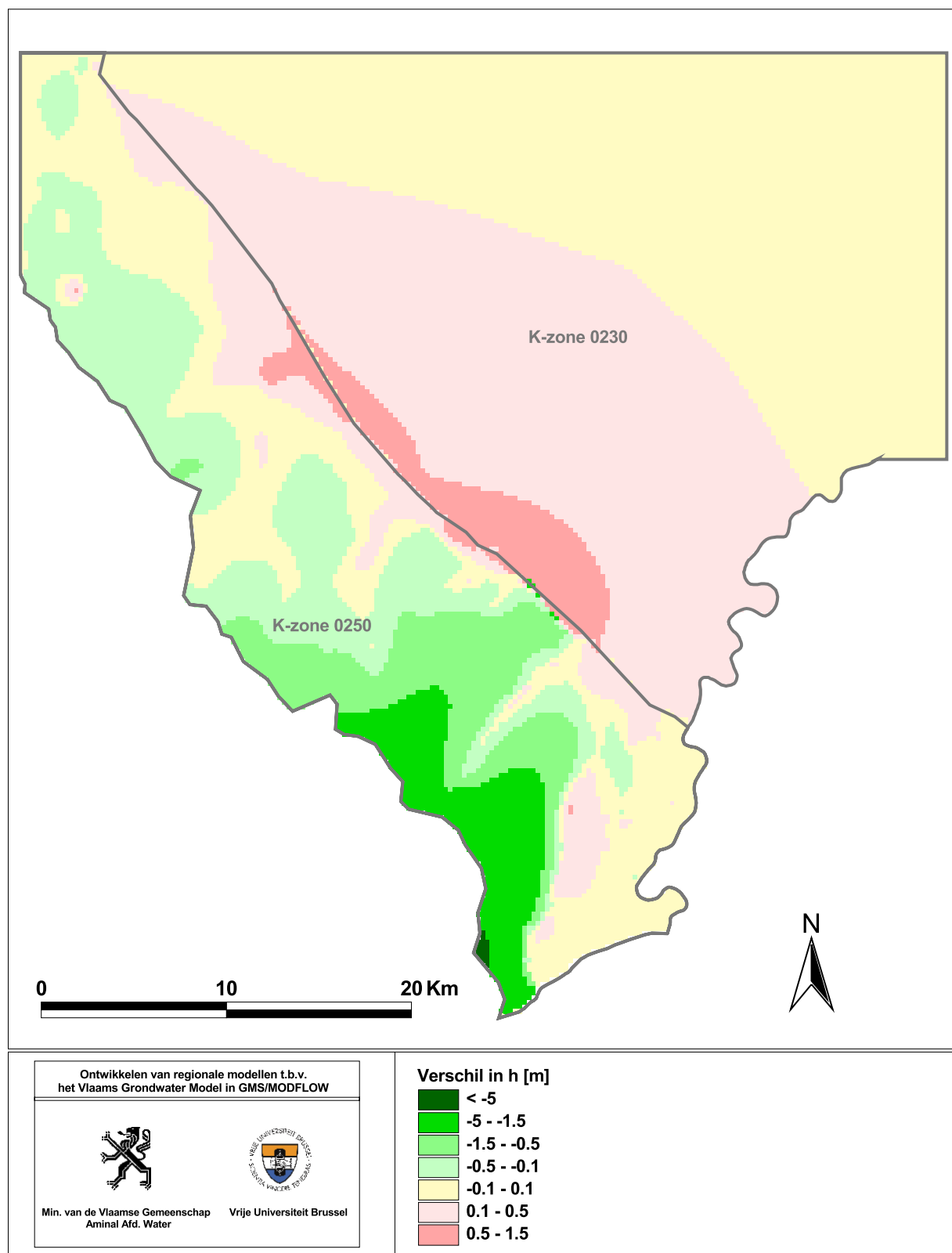
(b): De berekening van S_r is enkel gebaseerd op puntlocaties in de K-zone HCOV 0214 en is dus overschat.

(c): De berekening van S_r is enkel gebaseerd op puntlocaties in de K-zone HCOV 0214 en is dus onderschat.

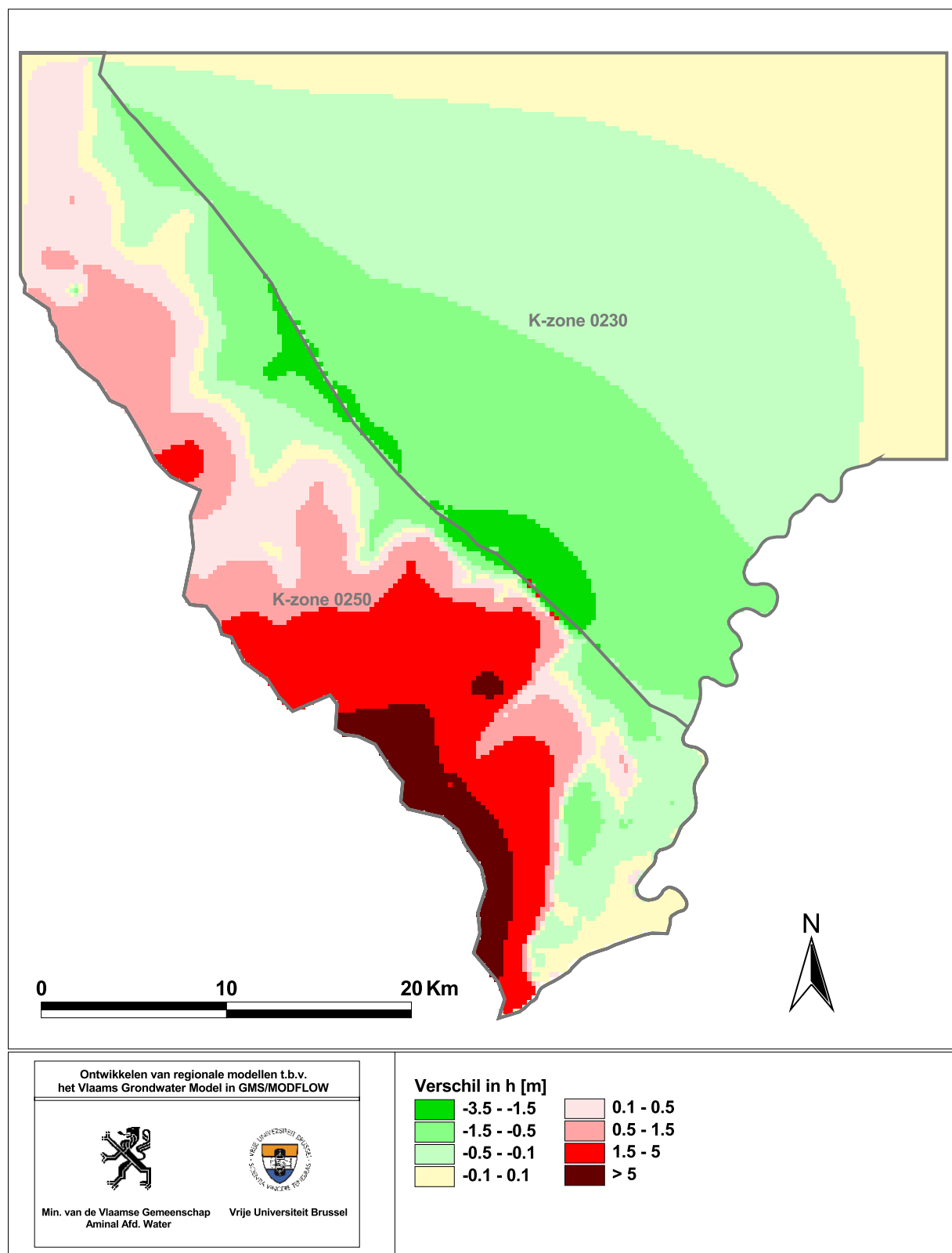
Belangrijke opmerking: De keuze van de puntlocaties beïnvloedt de resultaten van de gevoeligheidsanalyse. Bijv. een aantal puntlocaties in de buurt van belangrijke breukzones wegen in bepaalde lagen sterk door op S_r , terwijl dit aspect niet aan de orde is in modellaag 1 (Quartair Aquifersysteem). Figuur 4.1 toont de 24 geselecteerde puntlocaties.



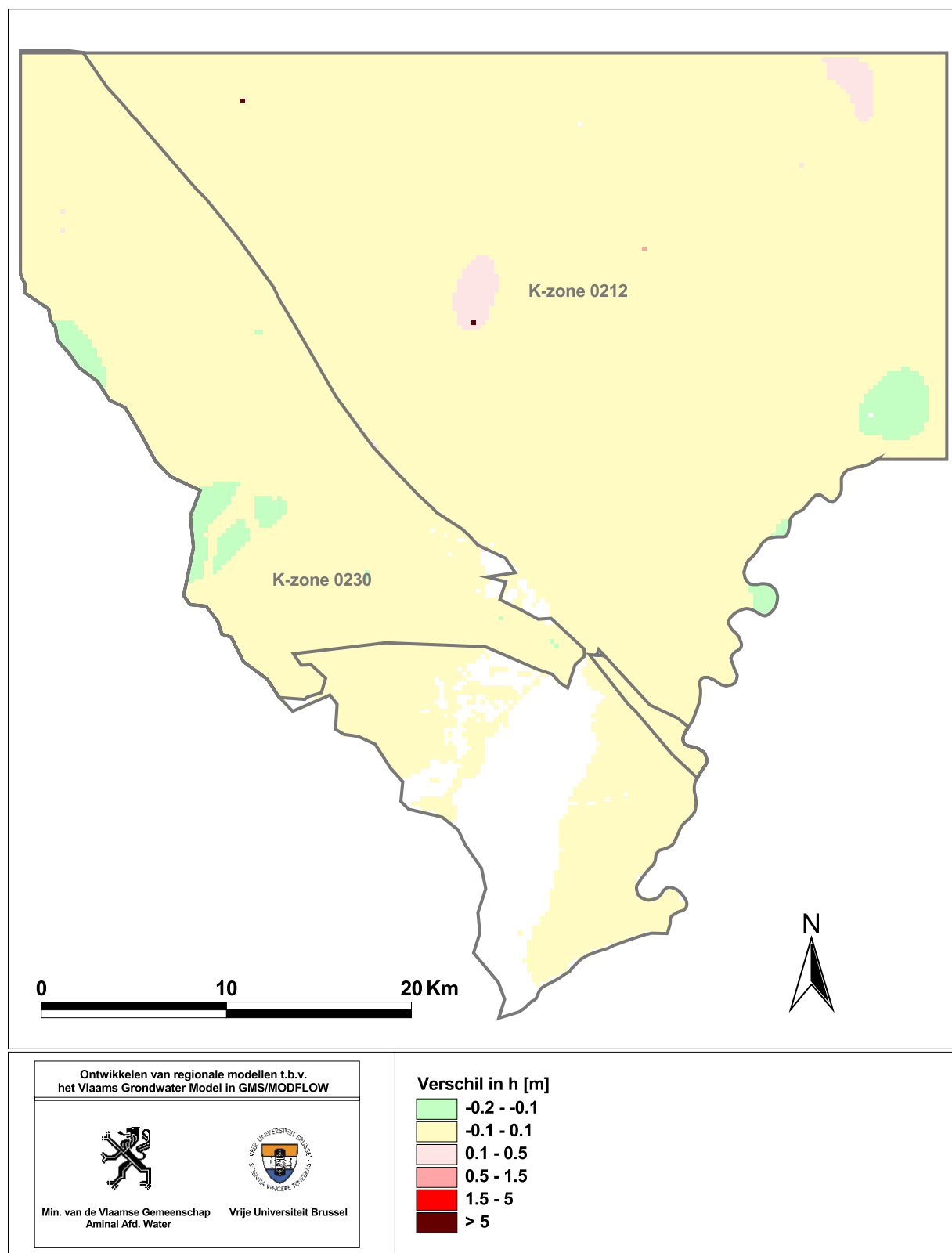
Figuur 4.1: Puntlocaties die gebruikt werden in de gevoeligheidsanalyse.



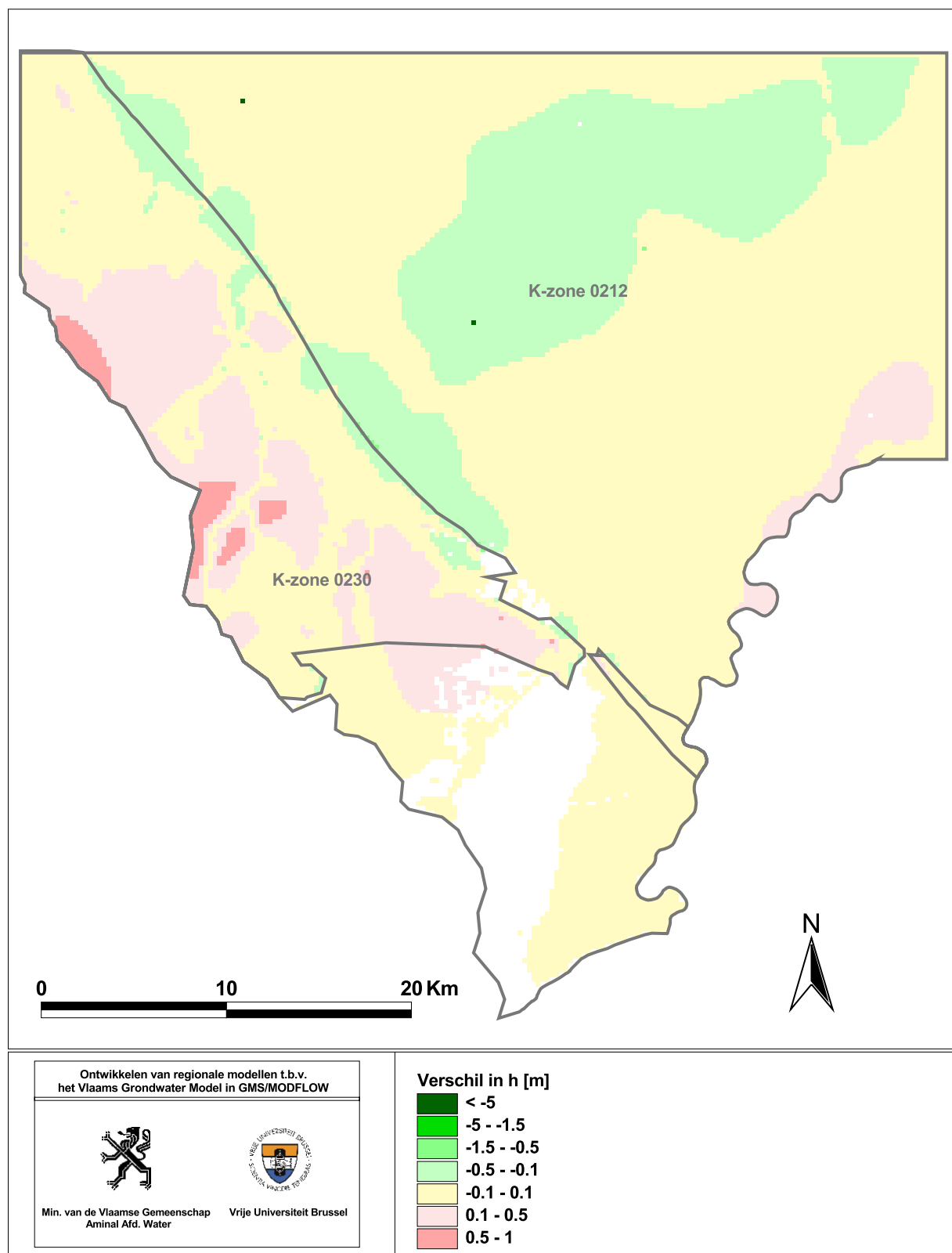
Figuur 4.2: Verandering in stijghoogte in modellaag 7 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0230 (i.e. 5 m/d) en HCOV 0250 (i.e. 3 m/d) : $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.



Figuur 4.3: Verandering in stijghoogte in modellaag 7 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\max}$ HCOV 0230 (i.e. 7 m/d) en HCOV 0250 (i.e. 40 m/d) : $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.



Figuur 4.4: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0212 (i.e. 0,0001 m/d) en HCOV 0230 (i.e. 5 m/d): $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.



Figuur 4.5: Verandering in stijghoogte in modellaag 3 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\max}$ HCOV 0212 (i.e. 0,01 m/d) en HCOV 0230 (i.e. 35 m/d): $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.

4.2 GRONDWATERVOEDING

Vier simulaties werden uitgevoerd waarbij de grondwatervoeding achtereenvolgens met 10% en 25% verhoogd en verlaagd werd.

Indien de grondwatervoeding met 25% gevarieerd wordt, bedraagt het gemiddeld verschil in de grondwatertafel over het hele gebied 15 cm. De impact manifesteert zich echter voornamelijk lokaal in de onmiddellijke omgeving van de westelijke modelrand, waar de verschillen tot 2,5 m oplopen (Figuur 4.6). Naar het oosten toe neemt de invloed geleidelijk af en vanaf de steilrand van het Kempisch Plateau is de invloed nog nauwelijks merkbaar.

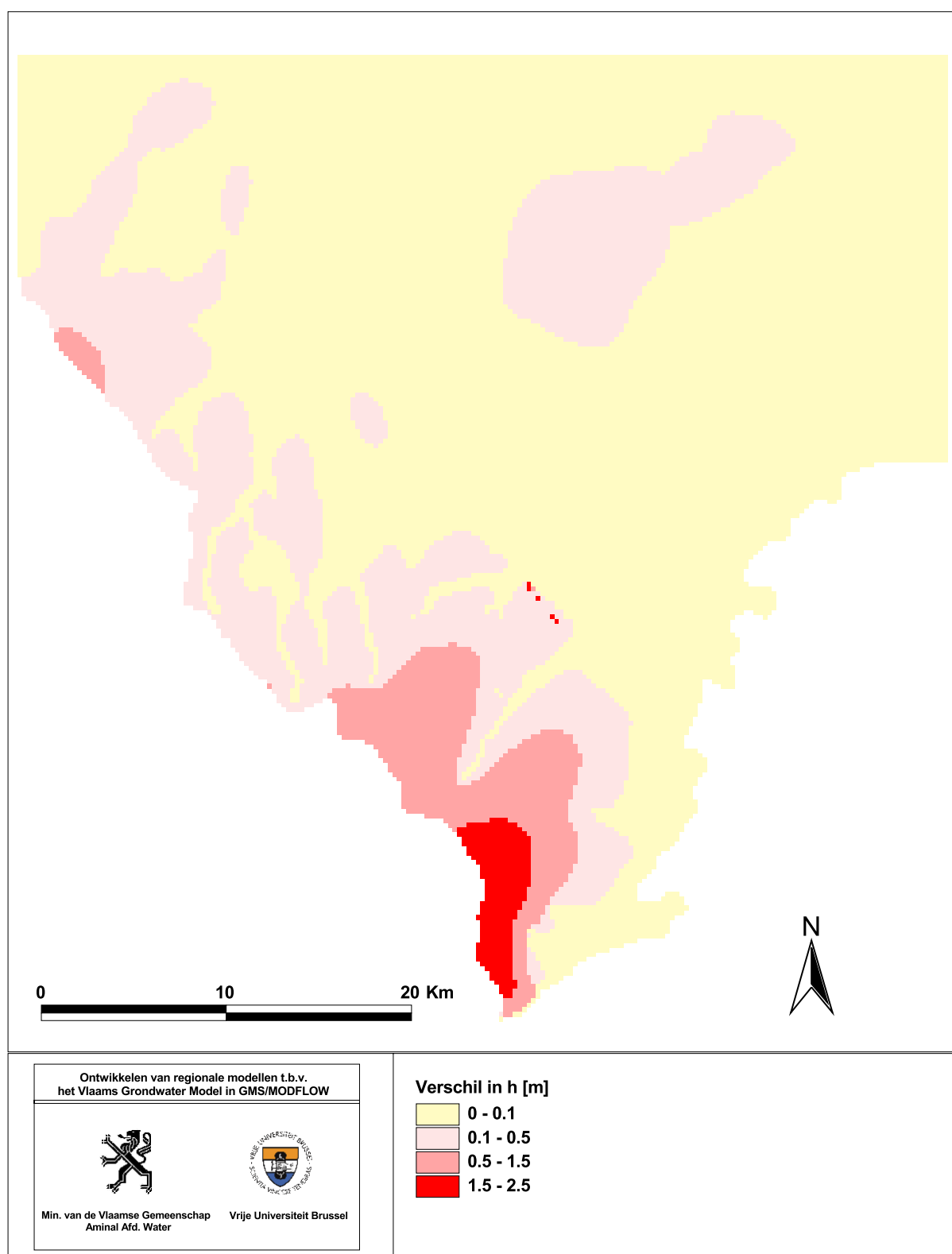
Wanneer de grondwatervoeding met 10% verhoogd of verlaagd wordt -wat een goede benadering is voor respectievelijk de gemiddelde grondwatervoeding in de winter en de zomer- tekent zich zoals verwacht hetzelfde patroon af zij het minder uitgesproken. De grootste veranderingen in de grondwatertafel doen zich ook voor aan de westelijke modelrand, met verschillen die tot 1 m kunnen oplopen. De gemiddelde verandering in de grondwatertafel over het hele modelgebied bedraagt echter slechts een 5-tal cm.

De relatieve gevoeligheid S_r van de grondwatertafel t.a.v. de grondwatervoeding bedraagt ca. 1,1.

4.3 VASTE STIJGHOOGTE GRENSVOORWAARDEN

De vaste stijghoogte grensvoorwaarden, in het noorden en zuiden 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.

Aan de zuidelijke modelgrens uit de invloed zich vooral in de onmiddellijke omgeving van de rand, en over een afstand van ca. 2 km van de rand is de invloed nauwelijks nog merkbaar (verandering in grondwatertafel < 10 cm). Aan de noordelijke modelrand werkt de invloed verder door, echter ook hier is over een afstand van max. 5 km van de rand nog nauwelijks een effect op de stijghoogte waarneembaar (verandering in grondwatertafel < 10 cm).



Figuur 4.6: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een afname van 25% in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}}$ minus h_s .

4.4 GRONDWATERWINNINGEN

De impact van een verandering in opgepompt volume op de grondwatertafel manifesteert zich logischerwijze voornamelijk in de omgeving van de drinkwaterwinningen. In de onmiddellijke omgeving van de drinkwaterwinningen te As, Maasmechelen, Beegden, Heel en Luykgestel leidt een verandering van 25% in het opgepompt volume tot veranderingen in de grondwatertafel van ca. 0,5 m. Over een afstand van max. 2,5 km van de winningen is de invloed nauwelijks nog merkbaar (verandering in grondwatertafel < 10 cm), en de gemiddelde verandering in de grondwatertafel over het hele modelgebied bedraagt slechts een 2-tal cm. De relatieve gevoeligheid S_r van de grondwatertafel t.a.v. de verandering in opgepompt volume bedraagt ca. 0,3.

In geval van een scenario zonder grondwaterwinningen wordt rondom de drinkwaterwinning van As een toename in de grondwatertafel van 3 m vastgesteld. Ter hoogte van de drinkwaterwinningen van Maasmechelen, Beegden, Heel en Luykgestel bedraagt de toename max. 1 m. Rond de overige drinkwaterwinningen is het verschil beperkt tot max. 30 cm. Hetzelfde patroon, maar omgekeerd (afname in grondwatertafel), tekent zich af indien gerekend wordt met het tweevoud van het actueel opgepompte volume. Voor beide scenario's bedraagt de gemiddelde verandering in de grondwatertafel over het hele modelgebied zo'n 8 cm.

4.5 DRAINAGE

4.5.1 Drainconductantie

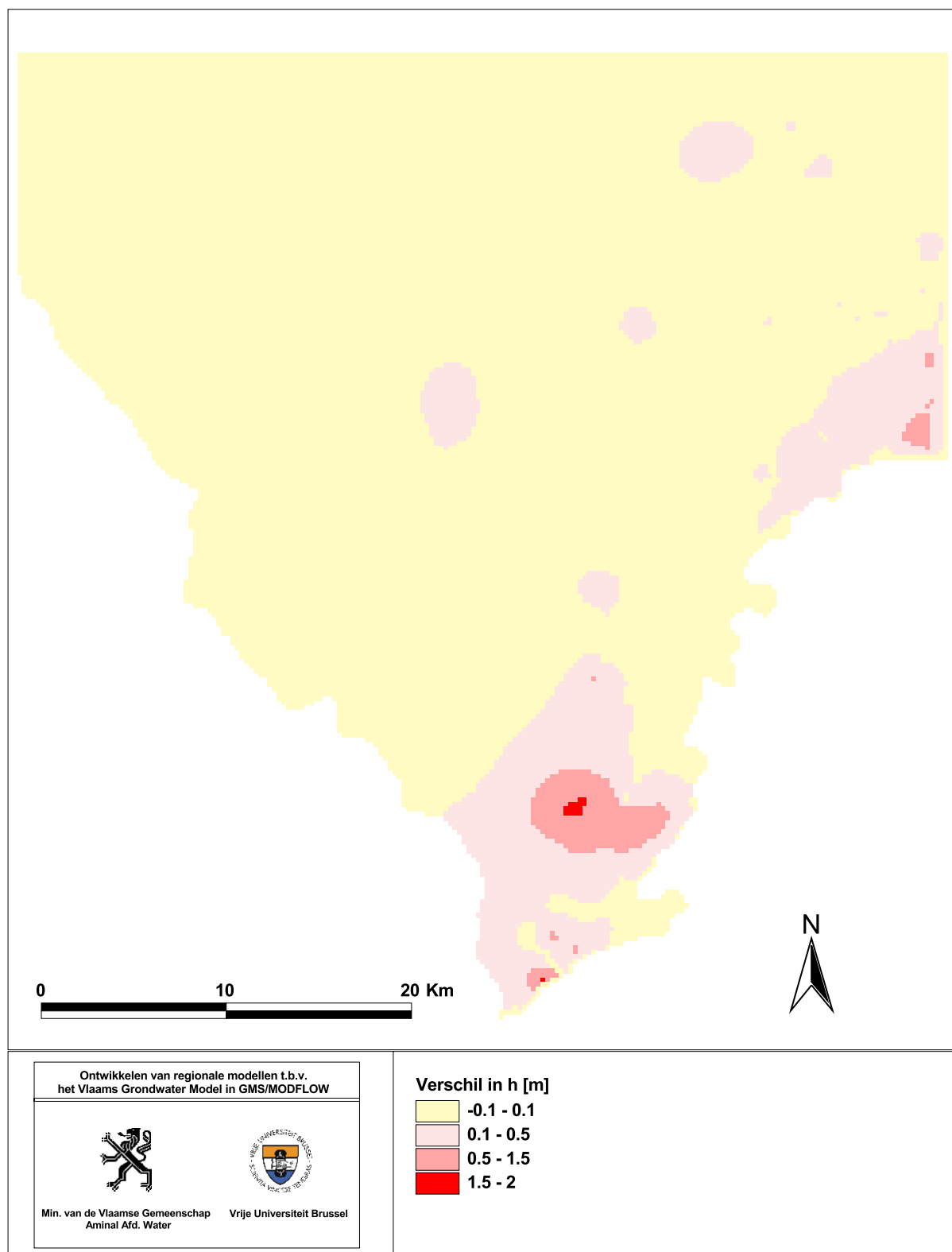
Indien de drainconductantie met een factor 4 en 10 gevarieerd wordt dan kan het volgende afgeleid worden. De grootste veranderingen in de grondwatertafel doen zich voor ter hoogte van het mijnverzakkingsgebied, en in het noorden van de Maasvallei net over de Nederlandse grens. Elders in het modelgebied is de invloed van een verandering in drainconductantie zoals verwacht erg beperkt, daar het grondwater zich op de hoger gelegen delen (Kempisch Plateau) beneden het drainageniveau bevindt. Figuur 4.7 toont de veranderingen in de grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 4 toename in drainconductantie.

De gemiddelde verandering in de grondwatertafel over het hele modelgebied bij een factor 4 verandering in drainconductantie bedraagt slechts een 5-tal cm, in geval van een factor 10 verandering bedraagt de gemiddelde verandering zo'n 7 cm. Voor een factor 4 verandering in drainconductantie treden in het mijnverzakkingsgebied veranderingen tot 2 m op in de grondwatertafel, en tot 3 m bij een factor 10 verandering in conductantie. De relatieve gevoeligheid S_r van de grondwatertafel t.a.v. de conductantie bedraagt ca. 0,03.

4.5.2 Onbekend drainageniveau

Een simulatie werd uitgevoerd voor het scenario waarbij de “gaten” in de drainagekaart opgevuld werden met een drainagepeil gelijk aan 0,5 m onder de topografie, in plaats van de aangenomen “topografie - 5 cm” (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.4 en 3.4.2). De max. verandering in grondwatertafel bedraagt 10 cm voor dit scenario.

Het onderlinge verschil in grondwatertafel bij een factor 4 verandering in drainconductantie, voor de twee respectievelijke scenario's waarbij de “gaten” werden opgevuld met een drainagepeil gelijk aan “topografie - 5 cm” *versus* “topografie - 0,5 m”, bedraagt max. 20 cm. De invloed manifesteert zich uiteraard enkel lokaal, ter hoogte van de “gaten”; de gemiddelde verandering in grondwatertafel over het hele modelgebied is $\ll 1$ cm is.



Figuur 4.7: Verandering in grondwaterniveau t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 4 toename in drainconductantie (i.e. 4000 m²/d t.h.v. mijnverzakkingsgebied en 1000 m²/d elders in het modelgebied): $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.

4.6 WATERLOPEN

4.6.1 Conductantie sedimentbodem

Om de impact van de bodemconductanties van de rivieren en kanalen op de modelresultaten te onderzoeken werden de conductanties (per eenheidslengte) met een factor 2 gevarieerd. De individuele impact van de kanaal- en Maasconductanties werd eveneens nagegaan.

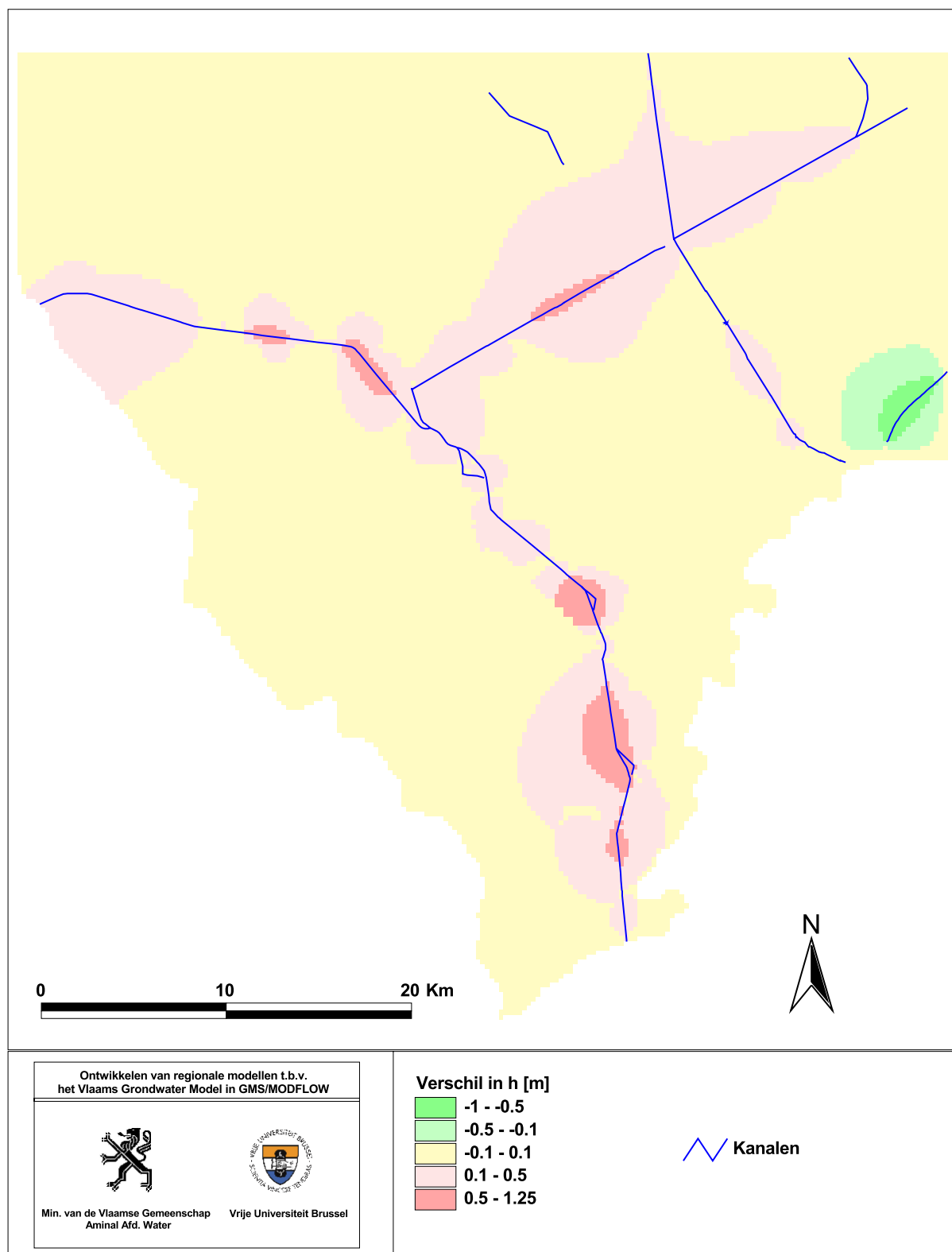
Bij een factor 2 verandering in kanaalconductantie treden, op enkele locaties na, langsheen het volledige kanalenstelsel veranderingen in de grondwatertafel > 20 cm op, en op sommige plaatsen lopen de verschillen op tot een meter. Figuur 4.8 toont de verandering in de grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 2 afname in conductantie. Door de hoogteligging van de kanalen leidt een lagere conductantie tot een lagere gesimuleerde stijghoogte in de omgeving van de kanalen. Enkel in de buurt van het Lateraal Kanaal, aan Nederlandse zijde, wordt een hogere stijghoogte gesimuleerd. De reden hiervoor ligt in het lage waterpeil (ca. 16 mTAW) in combinatie met de grote breedte (ca. 100 m), en dus hogere conductantie, van dit kanaaltraject. In het zuiden van het modelgebied is de invloed aan weerszijden van de Zuid-Willemsvaart tot op ongeveer 4 km merkbaar. Dit is ook het geval voor het traject van de Zuid-Willemsvaart aan Nederlandse zijde van het modelgebied. Elders, en ook voor de andere kanalen, reikt de invloed niet verder dan 1 tot 1,5 km.

De invloed van een verandering in de Maasconductanties blijft beperkt tot de Maasvallei. De verandering in de grondwatertafel bedraagt max. 70 cm.

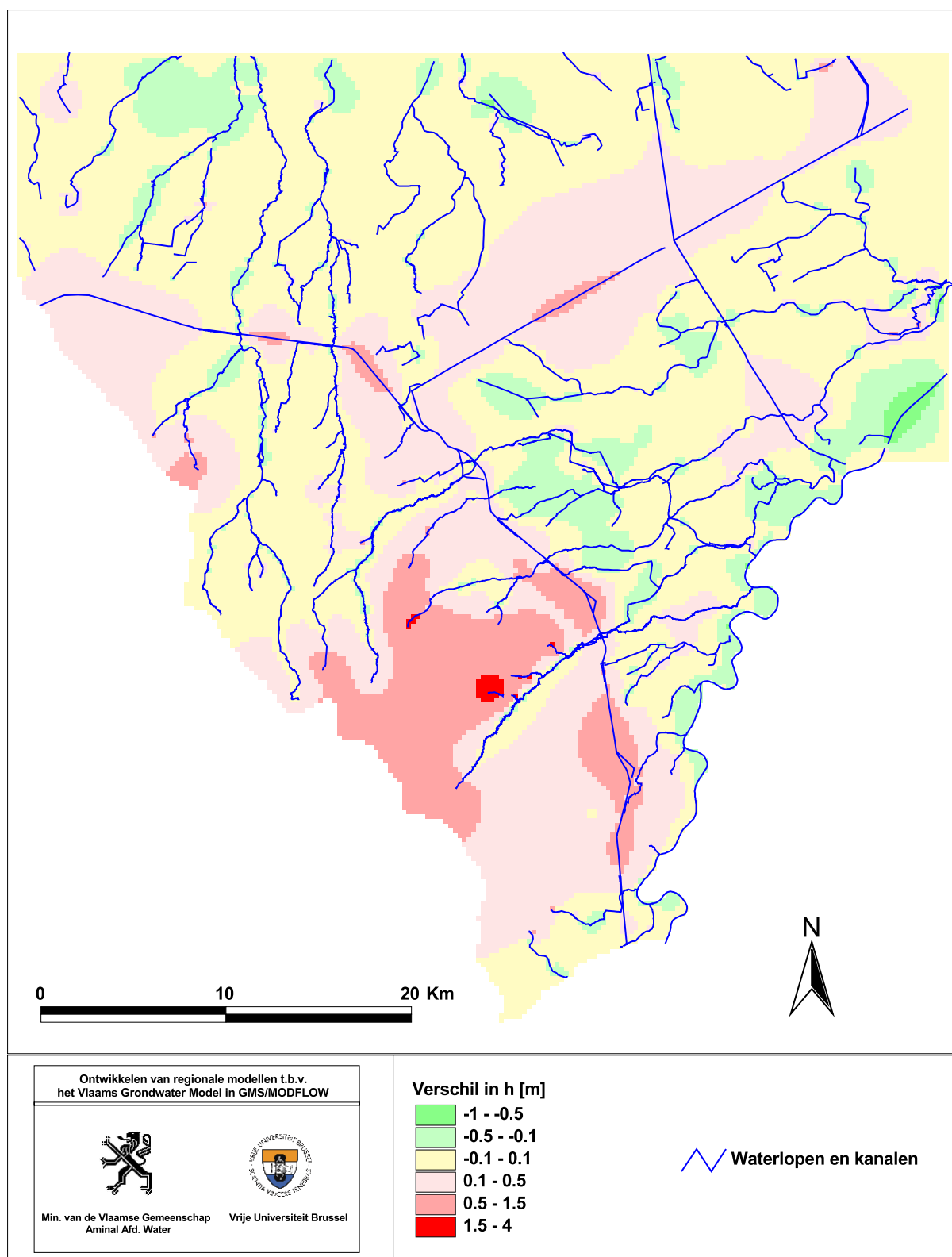
Voor het gecombineerde effect, waarbij voor alle rivieren en kanalen de conductanties met een factor 2 gevarieerd werden, is naast de eerder waargenomen trends voor de kanalen en de Maas zoals hierboven beschreven, voornamelijk een belangrijke invloed merkbaar op de hoger gelegen delen (Kempisch Plateau), zie Figuur 4.9.

4.6.2 Maaspeil

De gebruikte invoergegevens voor het Maaspeil betreffen de waarden zoals berekend op basis van de verhanglijnen, cfr. paragraaf 3.4.1. Bij gemiddelde afvoeren, zoals aangenomen in de huidige modelopzet, kunnen de berekende Maasstanden tot enkele decimeters lager zijn dan de werkelijk gemeten waterstanden (zie ook MER Grensmaas 2003, Royal Haskoning). Het effect van deze onzekerheid (onnauwkeurigheid) werd nagegaan door het scenario door te rekenen waarbij de Maasstanden met 30 cm verhoogd werden. Uit de resultaten kan afgeleid worden dat het effect op de grondwatertafel zich zoals verwacht beperkt tot de Maasvallei zelf; aan de randen met de Tussenterrassen is er over het algemeen nauwelijks nog een invloed merkbaar.



Figuur 4.8: Verandering in grondwaterniveau t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 2 afname in kanaalconductantie: $h_{\text{referentie}}$ minus h_s .



Figuur 4.9: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor een factor 2 afname in rivier- en kanaalconductantie: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.

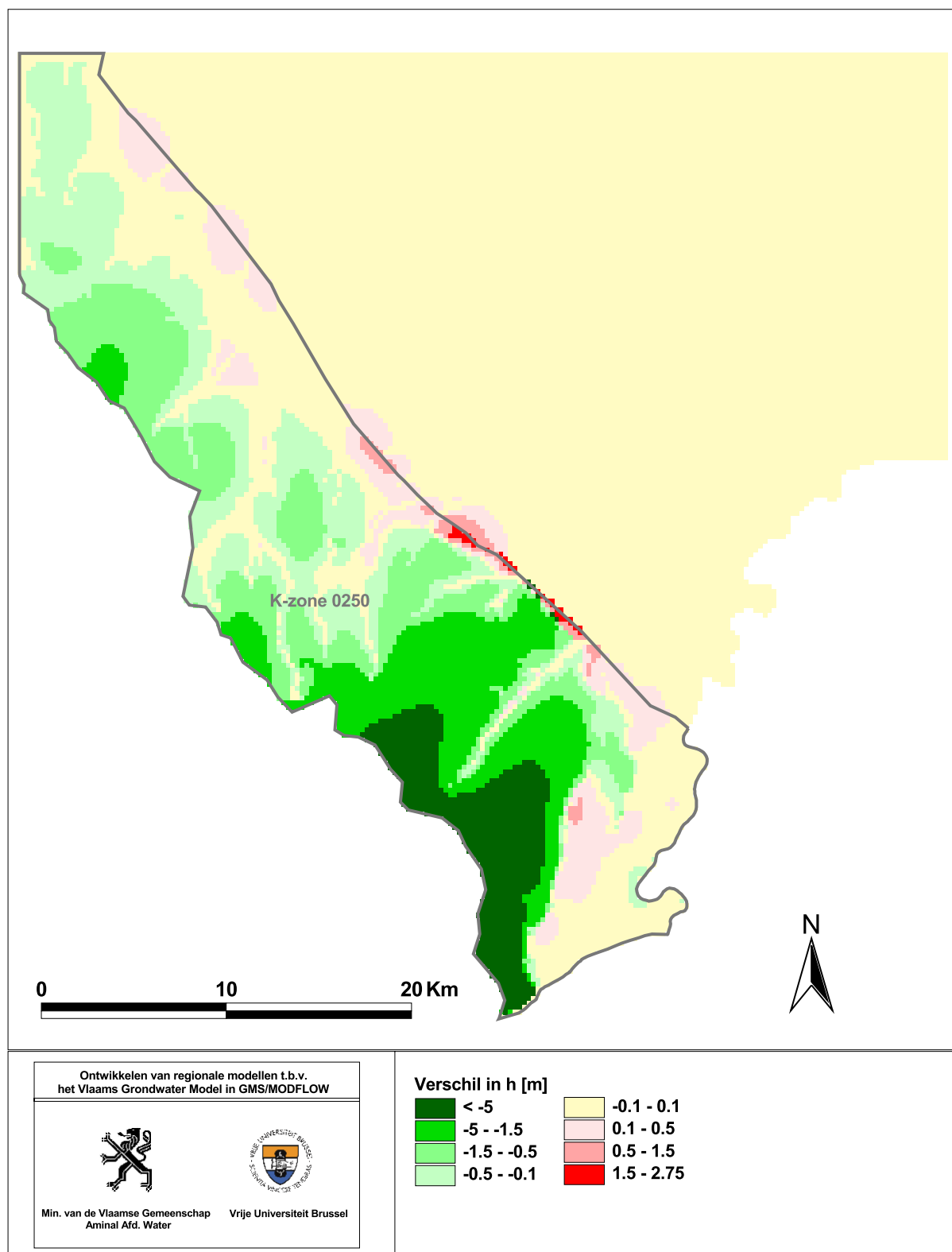
4.7 GECOMBINEERD EFFECT

Totnogtoe werd 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 de meest gevoelige parameters nagegaan, met name de doorlatendheid en de grondwatervoeding. De hydraulische doorlatendheid en de grondwatervoeding werden samen gevarieerd, waarbij lage doorlatendheden gebruikt werden in combinatie met een hoge grondwatervoeding, en omgekeerd, hoge doorlatendheden met een lage grondwatervoeding.

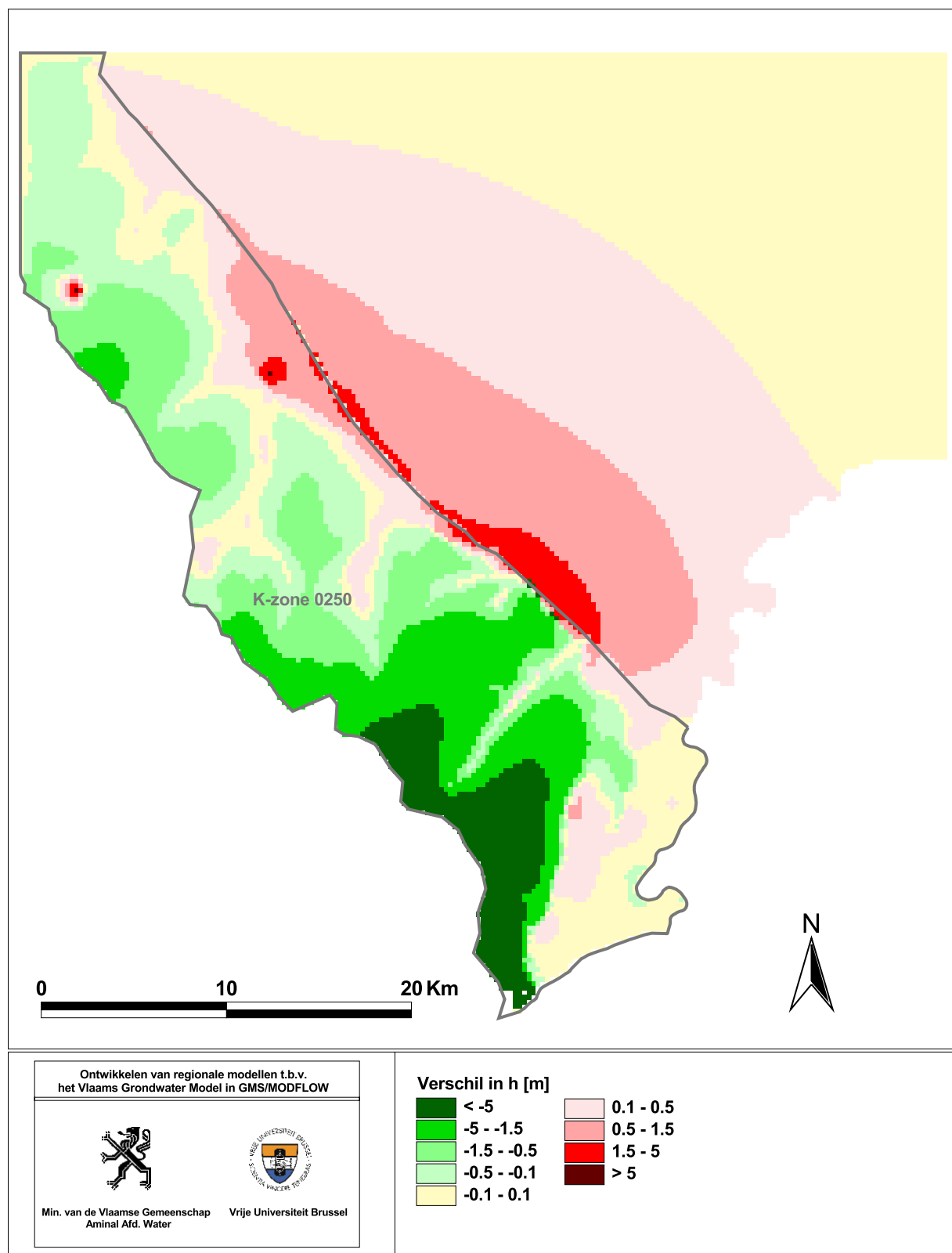
Het gecombineerde effect van $K_{\min}$ voor laag 1 ($K_{\text{referentie}} \cdot 4$; cfr. Tabel 4.1) en een toename van 10% in de grondwatervoeding, en andersom, van $K_{\max}$ voor laag 1 ($K_{\text{referentie}} \cdot 2$; cfr. Tabel 4.1) en een afname van 10% in de grondwatervoeding, levert de volgende resultaten op. In eerstgenoemde scenario treden veranderingen, zowel stijgingen als dalingen, in de grondwatertafel tot 4 m op; in het tweede scenario bedragen de veranderingen max. 2,8 m. De grootste veranderingen doen zich voor in het zuiden van het modelgebied, vanaf de westelijke modelrand, en op sommige plaatsen in de Maasvallei. Dit is wat kon verwacht worden op basis van de eerder gedane vaststellingen uit de gevoeligheidsanalyse t.a.v. de grondwatervoeding en de doorlatendheid afzonderlijk.

Het gecombineerde effect van $K_{\min}$ voor de K-zone HCOV 0250 in laag 6 en 7 (i.e. 3 m/d) en een toename van 10% in de grondwatervoeding, en andersom van $K_{\max}$ (i.e. 40 m/d) en een afname van 10% in de grondwatervoeding, leidt tot de volgende resultaten:

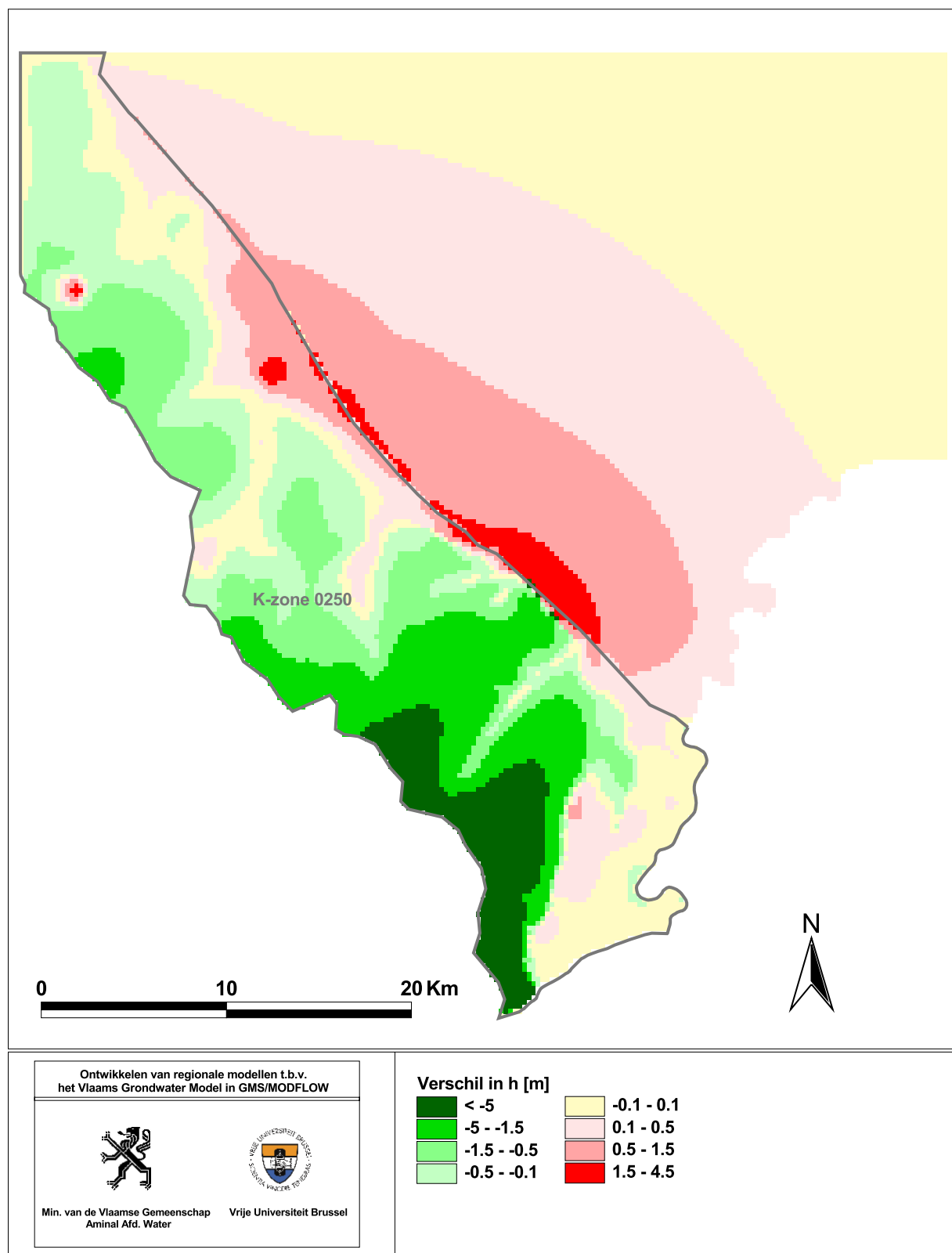
t.a.v. de grondwatertafel: in eerstgenoemde scenario treedt lokaal, aan de westelijke modelrand, een stijging van de grondwatertafel met meer dan 10 m en op sommige locaties zelfs 15 m op; naar het oosten toe op het Kempisch Plateau neemt de invloed geleidelijk af en ter hoogte van de Feldbissbreuk zijn er een aantal locaties waar een daling van ca. 2 m in de grondwatertafel wordt waargenomen (Figuur 4.10). Een gelijkaardig patroon, maar dan omgekeerd, tekent zich af voor het tweede scenario. De invloed naar het oosten reikt hier evenwel iets verder, tot in de Maasvallei. t.a.v. de stijghoogte in laag 6 en 7: gezien het freatisch regime ten zuiden van de Feldbissbreuk (geen afsluitende kleilagen aanwezig) tekent zich hier quasi hetzelfde patroon af als t.a.v. de grondwatertafel (Figuren 4.11 en 4.12). Echter, daar waar de invloed op de grondwatertafel in de zone ten noorden van de Feldbissbreuk vrijwel verwaarloosbaar is, is er in de noordelijke zone wel duidelijk een invloed merkbaar op de stijghoogte in laag 6 en 7, met dalingen in stijghoogte tot 1,5 m en plaatselijk, ter hoogte van de Feldbissbreuk, zelfs 5 m. Meer naar het noordoosten toe neemt de invloed geleidelijk af.



Figuur 4.10: Verandering in grondwatertafel t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk (i.e. 3 m/d) en een toename van 10 % in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}}$ minus h_s .



Figuur 4.11: Verandering in stijghoogte in modellaag 6 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk (i.e. 3 m/d) en een toename van 10 % in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.



Figuur 4.12: Verandering in stijghoogte in modellaag 7 t.o.v. de referentiesituatie voor $K_{\min}$ HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk (i.e. 3 m/d) en een toename van 10 % in de grondwatervoeding: $h_{\text{referentie}} \text{ minus } h_s$.

5 Calibratie

Het doel van de calibratie is de modelparameters aan te passen of te optimaliseren opdat een zo goed mogelijke overeenkomst tussen de berekende en de gemeten stijghoogten wordt verkregen.

In het modelgebied zijn in totaal 327 peilputten met een filter in het Quartair Aquifersysteem (0100) en/of Kempens Aquifersysteem (0200), die een meetreeks hebben voor het jaar 2000. Het betreft 222 peilputten, overeenkomend met 306 putfilters, aan Vlaamse zijde en 105 peilputten, overeenkomend met 230 putfilters, aan Nederlandse zijde. Echter, gezien het een regionale modellering betreft werden de peilputten van meetnet 7 (peil gemeten in winningsputten), aan Vlaamse zijde, buiten beschouwing gelaten. Van meetnet 5 werd enkel een selectie van 27 putten, overeenkomend met 32 putfilters, weerhouden; het betreft peilputten die buiten de invloedssfeer van de drinkwaterwinningen liggen en op locaties waar geen putten van meetnet 1 in de nabije omgeving aanwezig zijn. De drie peilputten van meetnet 2 in het modelgebied werden ook buiten beschouwing gelaten voor de calibratie, wegens weinig betrouwbaar. Aan Nederlandse zijde werden vijf peilputten overeenkomend met acht putfilters, die binnen een straal van 500 m van een grondwaterwinning met een opgepompt debiet groter dan 30.000 m³/j (cfr. paragraaf 2.6) liggen, buiten beschouwing gelaten.

Voor elk van de weerhouden putfilters werd de gemiddelde stijghoogte voor het jaar 2000 berekend, die dan bij de calibratie 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). Twee observatiepunten in modellaag 1 (peilputten 7-0139, filter 1; 7-0174, filter 1) zijn mogelijks minder betrouwbaar omdat de betreffende peilputten tijdelijk onder water stonden of overgelopen zijn in 2000. 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. Samengevat, in totaal werden 251 observatiepunten beschouwd bij de calibratie. Het betreft 139 peilputten, overeenkomend met 219 observatiepunten, van meetnet 1 of een put aan Nederlandse zijde, en 27 putten van meetnet 5 overeenkomend met 32 observatiepunten.

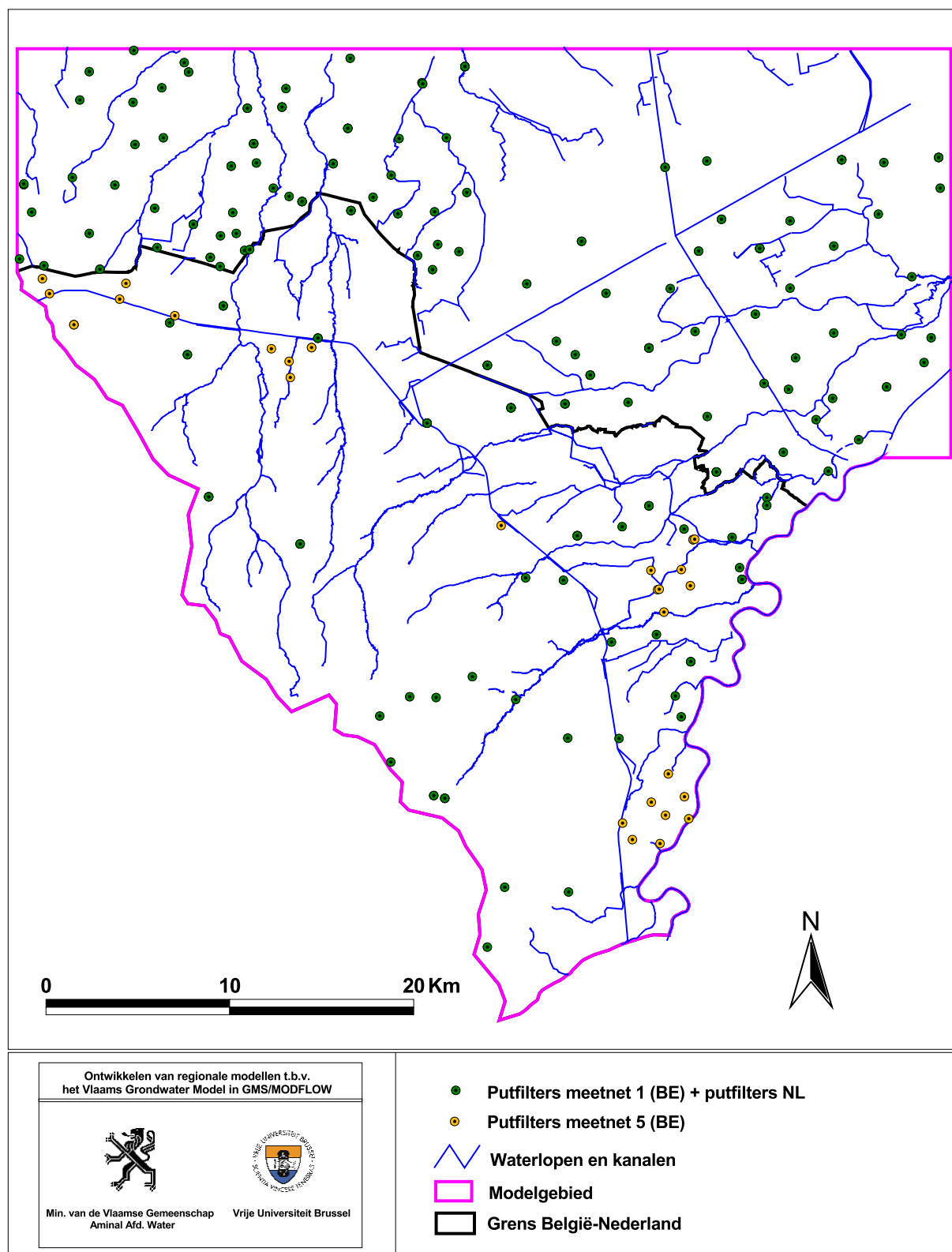
Figuur 5.1 toont de locaties van de peilputten in het modelgebied, 166 in totaal overeenkomend met 251 observatiepunten. Voor de locaties (X,Y) van de peilputten wordt verwezen naar Deelopdracht 1, Bijlage 3. Tabellen 5.1 en 5.2 geven respectievelijk een overzicht van het aantal observatiepunten per HCOV en per modellaag. Observatiepunten in de eenheid HCOV 0230 ten zuiden van de Feldbissbreuk werden (enkel) aan modellaag 2 toegekend (en niet aan laag 3 en 4); observatiepunten in de eenheid HCOV 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk werden (enkel) aan modellaag 6 toegekend (en niet aan laag 7); cfr. lagenopbouw Tabel 3.1 en Figuur 3.1.

Tabel 5.1: Overzicht van het aantal observatiepunten per HCOV gebruikt bij de calibratie.

HCOV	Aantal observatiepunten
0100	128
0211	34
0213	16
0215	19
0230	24
0250	30
Totaal:	251

Tabel 5.2: Overzicht van het aantal observatiepunten per modellaag gebruikt bij de calibratie.

Modellaag	Aantal observatiepunten
1	128
2	52
4	16
6	38
7	6
8	11
Totaal:	251



Figuur 5.1: Overzicht van de observatiepunten die gebruikt werden bij de calibratie.

Op basis van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse kan het volgende besloten worden:

- De freatische grondwatertafel is erg gevoelig t.a.v. veranderingen in K in modellaag 1 en 7, meerbepaald t.a.v. de K-zone 0173 en de K-zone(s) 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk; vooral in de diepe lagen is de grondwaterstijghoogte gevoelig aan veranderingen in K (in de respectievelijke laag).
- De grondwatertafel is beduidend gevoelig t.a.v. een verandering in de grondwatervoeding. De invloed manifesteert zich echter enkel lokaal, in de omgeving van de westelijke modelrand (Kempisch Plateau), elders is de invloed erg gering.
- Terwijl de invloed van een verandering in de grondwatervoeding zich voornamelijk lokaal manifesteert, brengt een verandering in het opgepompte volume een meer gedistribueerde –zij het gemiddeld kleinere– verandering in de grondwatertafel met zich mee.
- De impact van een verandering in de drainconductantie op de grondwatertafel is enkel merkbaar in de Maasvallei, vooral in het mijnverzakkingsgebied, en weegt globaal minder zwaar door dan een verandering in het gewonnen volume grondwater.
- De impact van een wijziging in de grensvoorwaarden blijft beperkt tot de directe omgeving van de modelranden.

Voorts kan uit de verschillende modelsimulaties tijdens de gevoeligheidsanalyse het volgende afgeleid worden:

- De waargenomen stijghoogteverschillen langsheen de Feldbissbreuk, de breuk van het Hoog van Bree, de Heerlerheidebreuk, de breuk van Hamont, de breuk van Elen en de Peelrandbreuk worden niet voldoende gereproduceerd in de modelresultaten. Om hieraan tegemoet te komen werden ter hoogte van deze breuken “schermen” of ‘horizontal flow barriers’ geïmplementeerd met behulp van de HFB-module (cfr. paragraaf 3.3.2).
- Voor de bodemconductantie van de kanalen werd initieel uitgegaan van een uniforme K-waarde van 0,07 m/d (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.3). Uit de verschillende model-simulaties is echter gebleken dat deze waarde te hoog is. Meerbepaald “voeden” de kanalen op deze manier te veel. Volgens mondelinge bronnen zouden bepaalde trajecten van de Zuid-Willemsvaart quasi ondoorlatend zijn. De conductanties werden zodoende aangepast uitgaande van een uniforme K-waarde van 0,01 m/d (concrete gegevens niet voor handen).
- De bodemconductanties van de rivieren, zoals afgeleid op basis van de digitale bodemkaart (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.3), werden eveneens te hoog bevonden en volgende aanpassingen werden doorgevoerd: voor de onbevaarbare waterlopen van 1^{ste} en 2^{de} categorie werd uitgegaan van een uniforme K-waarde van 0,1 m/d (~ K-waarde voor kleiig sediment), en voor de Maas van een uniforme K-waarde van 0,5 m/d (Digitale bodemkaart - OC-GIS Vlaanderen, 2001; Saxton et al., 1986). Voor de dikte van de sedimentbodem werden volgende waarden gehanteerd: Maas: 1,5 m; 1^{ste} categorie waterlopen: 0,5 m; 2^{de} categorie waterlopen: 0,2 m. Op basis van een analyse van de modelresultaten voor de aangepaste conductanties werden, bij

verdere calibratie, de rivierconductanties (per eenheidslengte) gehalveerd voor de rivieren in het hoger gelegen deel ten zuiden van de Feldbissbreuk (zie ook paragraaf 4.6).

- In het oosten van het modelgebied, aan de Belgisch-Nederlandse grens, werden grote afwijkingen vastgesteld tussen de gesimuleerde en gemeten stijghoogten. In deze regio zijn een aantal plassen gelegen, die initieel niet werden opgenomen in het model. De plassen werden in het model ingebracht als een rivier randvoorwaarde. Voor de plassen die in open verbinding staan met de Maas, werd hiertoe het Maaspeil gebruikt. Aan Nederlandse zijde bevinden zich een aantal geïsoleerde plassen, en gezien het ontbreken van gegevens werd het waterpeil hier afgeleid van het AHN (resolutie: 25x25 m).

Gelet op de resultaten van de gevoeligheidsanalyse werd een bijkomende parameterzone gedefinieerd voor de K-zone HCOV 0250 in modellaag 7 op basis van het voorkomen van de respectievelijke HCOV-basiseenheden. Om consistent te zijn, werd in modellaag 8 ook een bijkomende parameterzone voor de K-zone HCOV 0250 gedefinieerd. Analoog werd voor de K-zone HCOV 0230 in modellaag 2 en 3 een verdere differentiatie doorgevoerd op basis van het voorkomen van de respectievelijke HCOV-basiseenheden. Figuren 5.2 en 5.3 tonen de bijkomende of aangepaste parameterzones voor respectievelijk de K-zones HCOV 0230 en 0250.

Na aanpassing van bovengenoemde aspecten werd opnieuw een automatische gevoeligheidsanalyse uitgevoerd in GMS, waarbij de gevoeligheid t.a.v. de verschillende K-parameterzones in het aangepaste model werd nagegaan op basis van de 'composite scaled sensitivity' CSS. Als startwaarde voor K werd vertrokken van de tot dan toe gevonden meest optimale waarden. Tabel 5.3 geeft de resultaten van de nieuwe gevoeligheidsanalyse. Hieruit blijkt dat zich een aantal wijzigingen hebben voorgedaan, zie Tabel 4.2 ter vergelijking. De belangrijkste veranderingen zijn de afgenomen gevoeligheid t.a.v. de K-zone(s) 0250 in laag 7, en de toegenomen gevoeligheid t.a.v. de K-zone 0213 en 0215. Voor het overige worden over het algemeen dezelfde trends waargenomen (cfr. Tabel 4.2).

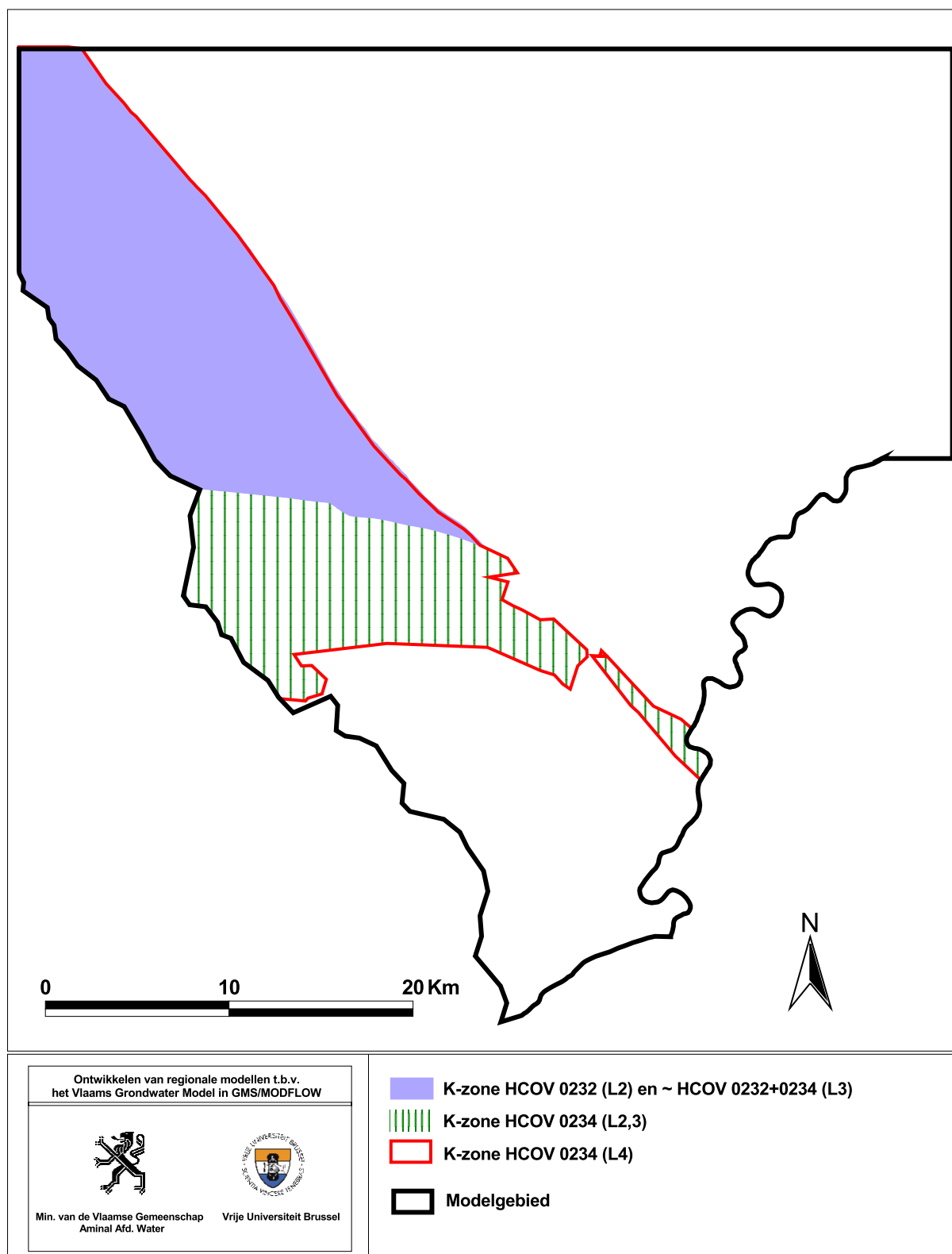
Tabel 5.3: K-parameterzones gerangschikt volgens gevoeligheid op basis van de 'composite scaled sensitivity' CSS; ranking: 1 = meest gevoelig, 20 = minst gevoelig. "N" en "Z" staan respectievelijk voor de relatief noordelijk en zuidelijk gelegen parameterzone.

Ranking	K-parameterzone	Startwaarde [m / d]	CSS [-]
1	HCOV 0250 (L6)	6	2,04
2	HCOV 0213	10	0,98
3	HCOV 0172	100	0,79
4	HCOV 0250 N (L8)	4	0,72
5	HCOV 0215	25	0,53
6	HCOV 0173	500	0,47
7	HCOV 0250 N (L7)	4	0,39
8	HCOV 0211	15	0,29
9	HCOV 0250 Z (L7)	0,5	0,187
10	HCOV 0171	20	0,187
11	HCOV 0230 N (L2)	8	0,186
12	HCOV 0230 (L4)	2	0,159
13	HCOV 0212	0,0005	0,138
14	HCOV 0230 N (L3)	6	0,136
15	HCOV 0250 Z (L8)	3	0,128
16	HCOV 0230 Z (L3)	2	6,57E-02
17	HCOV 0230 Z (L2)	2	6,00E-02
18	HCOV 0230 (L7)	2	4,88E-02
19	HCOV 0242	0,005	9,22E-03
20	HCOV 0214	0,001	1,80E-05

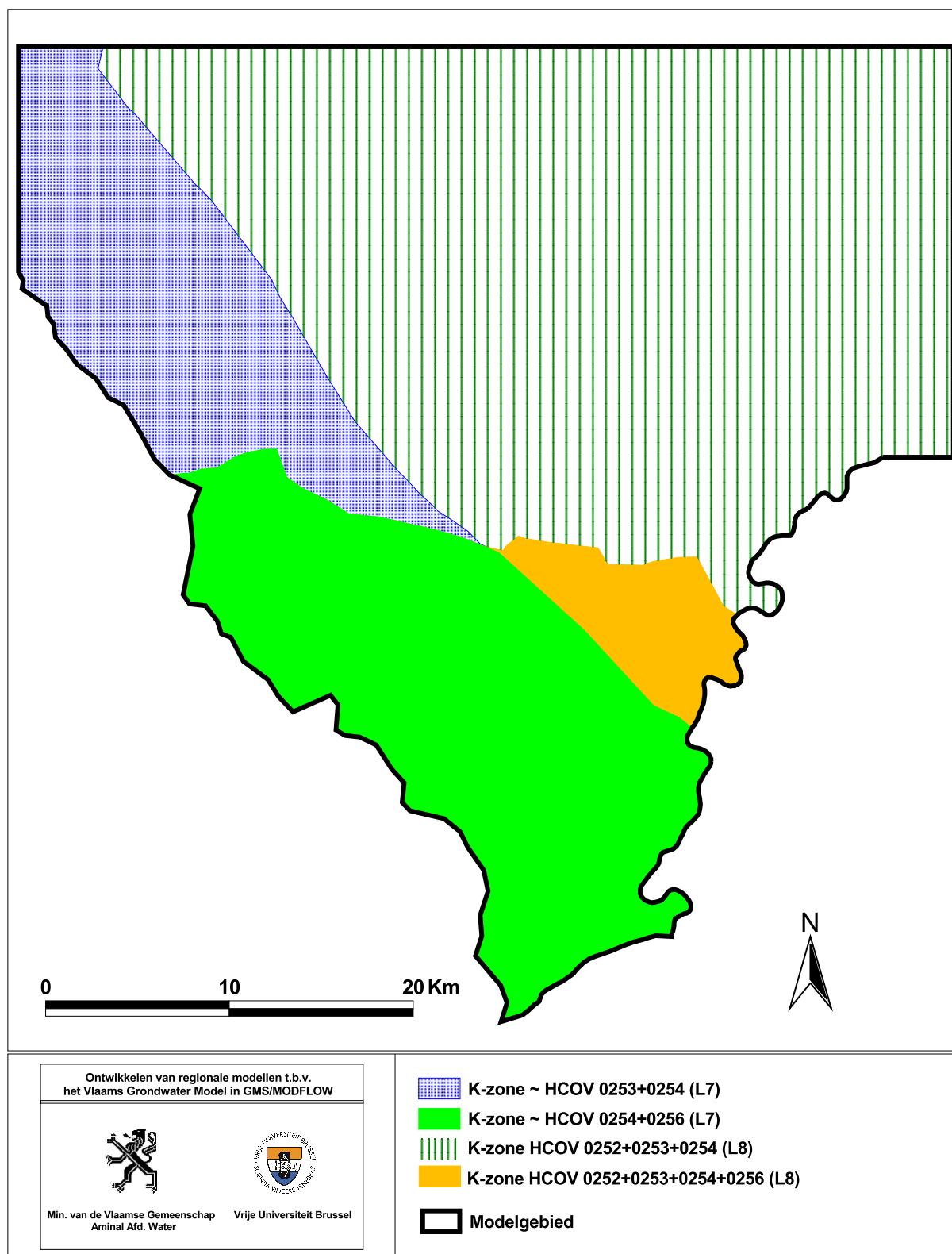
Opmerkingen:

De K-zones HCOV 0230 N en 0230 Z in laag 2 komen respectievelijk overeen met de basis-eenheden HCOV 0232 en 0234. In laag 3 komt de K-zone 0230 Z overeen met de basis-eenheid HCOV 0234, de K-zone HCOV 0230 N bestaat uit beide basiseenheden HCOV 0232+0234.

De K-zones HCOV 0250 N en 0250 Z in laag 7 bestaan in hoofdzaak uit respectievelijk de basiseenheden HCOV 0253+0254, en HCOV 0254+0256. In laag 8 bestaat de K-zone 0250 N uit de basiseenheden HCOV 0252+0253+0254; de K-zone HCOV 0250 Z bestaat uit de basiseenheden HCOV 0252+0253+0254+0256.



Figuur 5.2: Aangepaste parameterzones voor de K-zone HCOV 0230.



Figuur 5.3: Aangepaste parameterzones voor de K-zone HCOV 0250.

In eerste instantie werd getracht om de K-waarden te optimaliseren met behulp van de automatische calibratieroutine 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).

Uit de calibratie met PEST werden echter, afhankelijk van de gekozen startwaarden en de geselecteerde parameters, verschillende optimale waarden verkregen. M.a.w., de verkregen optimale parameterwaarden bleken niet uniek. De overeenkomst of 'fit' tussen de modelresultaten en de meetgegevens zegt dan ook niks over de uniekheid van de verkregen parameterwaarden, en uit de 95%-betrouwbaarheidsintervallen kon afgeleid worden dat enkel de K-parameterzone HCOV 0250 in laag 6 optimaliseerbaar is in de zin dat unieke optimale K-waarden worden verkregen. Dit is ook wat kon verwacht worden op basis van de resultaten van de (nieuwe) gevoeligheidsanalyse.

Daarom werd besloten om van de automatische calibratiemethode met PEST af te stappen en de K_h -waarden verder te optimaliseren via *trial & error*, in eerste instantie op basis van de globale 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. In geval van een afname in TSSR werd vervolgens naar 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} per modellaag gekeken:

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

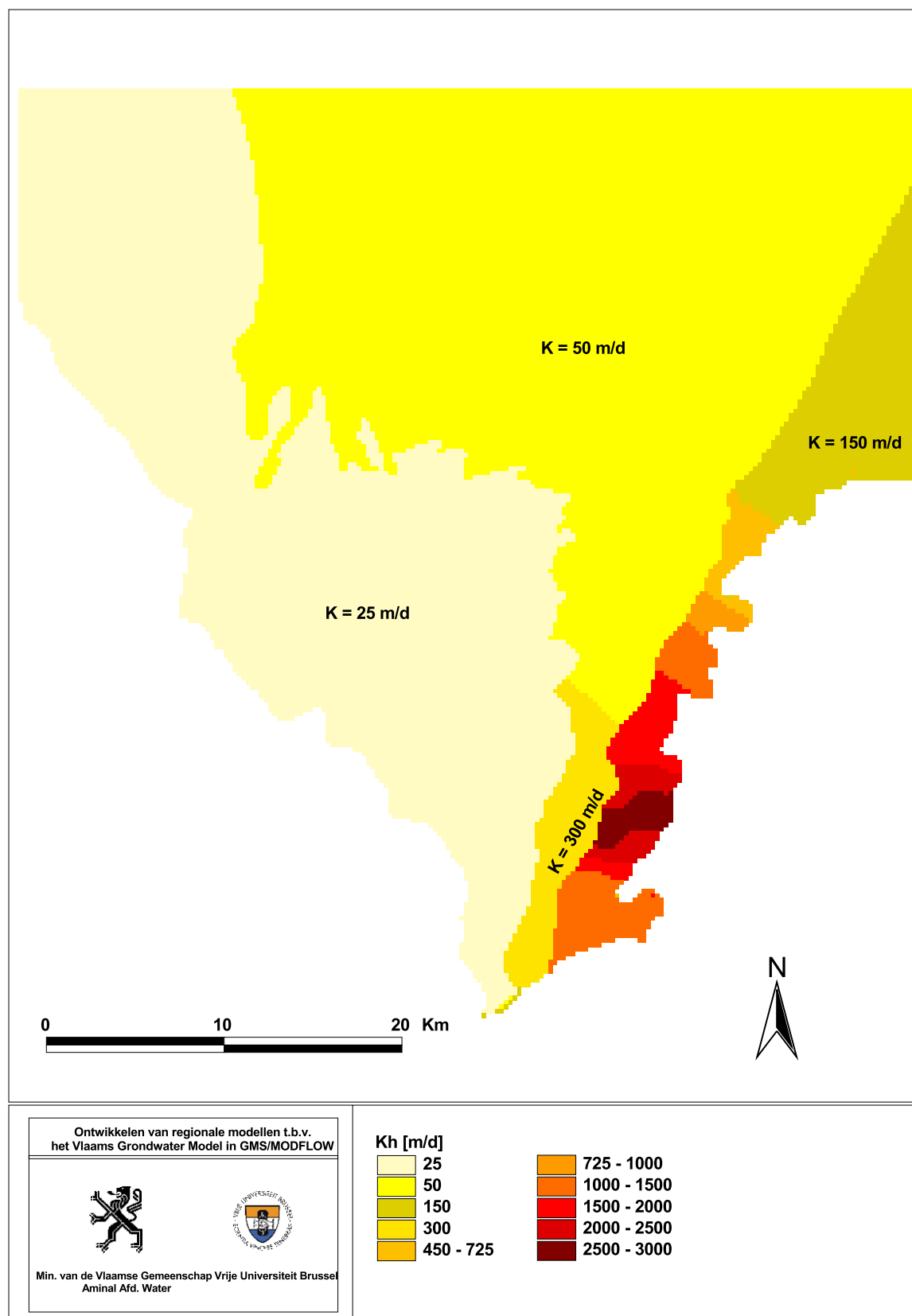
waarbij n het aantal observatiepunten is. Op basis hiervan werd de aanpassing in parameterwaarde al dan niet weerhouden.

Gezien de grote variabiliteit in doorlatendheid in de K-zone HCOV 0172 (cfr. Tabel 3.2) werd finaal ook voor deze eenheid een bijkomende parameterzone gedefinieerd in het zuiden van het modelgebied, waar de Tussenterrassen een smalle zone vormen tussen het Hoofdterras van de Maas en de Maasvallei. Tijdens de *trial & error* calibratie werd ook de K_h/K_v -verhouding geoptimaliseerd. Voor de zeer doorlatende grinden in de Maasvallei (K-zone HCOV 0173) en een deel van de zand- en grindhoudende Quartaire afzettingen op de Tussenterrassen (K-zone HCOV 0172) werd een K_h/K_v -verhouding van 10:1 als optimaal bevonden. Voor de zand- en grindhoudende Quartaire afzettingen op het Hoofdterras (K-zone HCOV 0171) en het overige deel van de Afzettingen van het Tussenterras (K-zone HCOV 0172) werd een optimale K_h/K_v -verhouding van 5:1 gevonden. Ook voor het Zand van Mol (K-zone 0230) in modellaag 2 en 3, de goed doorlatende basiseenheden van de Afzettingen ten noorden van de Feldbiss-breukzone (K-zone HCOV 0211, 0213 en 0215), en het Mioceen Aquifersysteem (K-zone HCOV 0250) in modellaag 6 en 7 bedraagt de optimale K_h/K_v -verhouding 5:1. Voor de K-zone HCOV 0234 (modellaag 2, 3, 4 en 7) en de K-zone 0250 Z in laag 8 werd een optimale K_h/K_v -verhouding van 2:1 weerhouden. Voor de kleiige lagen (K-zone HCOV 0212, 0214, 0242, en K-zone 0250 Z in laag 7) werd een K_h/K_v -verhouding van 1:1 gehanteerd. De gevoeligheid van de modelresultaten t.a.v. K_h/K_v werd niet expliciet getest, echter uit de verschillende simulaties tijdens de modelcalibratie kon afgeleid worden dat de modelresultaten slechts weinig gevoelig zijn aan de verhouding $K_h:K_v$. Vooral voor de zeer goed doorlatende eenheden bleek de verhouding $K_h:K_v$ weinig invloed te hebben.

Tabel 5.4 geeft de optimale K_h -waarden, verkregen na modelcalibratie. Figuur 5.4 geeft de variabiliteit in K voor modellaag 1 (HCOV 0100: Quartair Aquifersysteem) na modelcalibratie. De optimale K-waarde van 2,5 m/d voor de K-zone HCOV 0234 ligt buiten de fysische range zoals gegeven in Tabel 4.1. Echter, de gevonden waarde komt overeen met het geometrisch gemiddelde van de K-waarden (fysische range: 0,06–10,18 m/d) voor de basiseenheid HCOV 0234 in het Centraal Kempisch Systeem (Meyus et al., 2004). De optimale K-waarde van 0,2 m/d voor één van de drie fysisch onderscheiden K-parameterzones HCOV 0242, ligt buiten de fysische range zoals gegeven in Tabel 4.1. De waarde valt echter wel binnen de range van K-waarden voor de basiseenheid HCOV 0242 in het Centraal Kempisch Systeem (Meyus et al., 2004), i.e. 0,02–10,24 m/d (geometrisch gemiddelde: 0,14 m/d).

Tabel 5.4: Optimale K-waarden na modelcalibratie. Voor de betekenis van de opdeling van de K-zones HCOV 0230 (modellaag 2 en 3) en HCOV 0250 (modellaag 7 en 8) in een noordelijke “N” en zuidelijke “Z” parameterzone wordt verwezen naar Tabel 5.3.

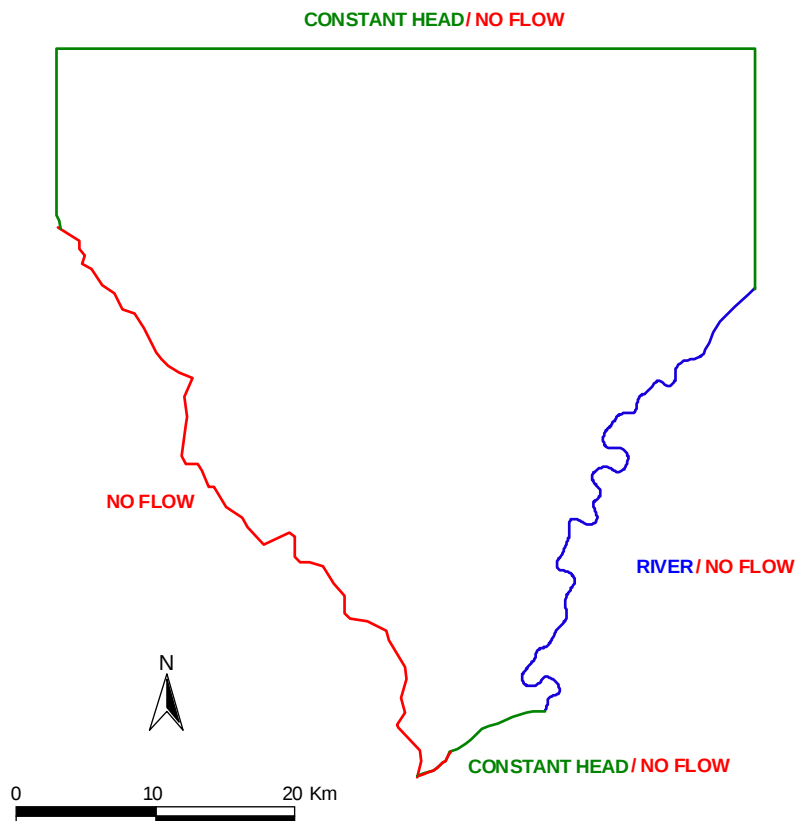
Modellaag	HCOV of K-zone	Optimale K_h [m / d]	Optimale $K_h:K_v$
1	0171	25	5:1
	0172	50; 300	5:1; 10:1
	0173	150-2.808	10:1
2	0211	30	5:1
	0230 N	6	5:1
	0230 Z	2,5	2:1
3	0212	0,0008	1:1
	0230 N	6	5:1
	0230 Z	2,5	2:1
4	0213	15	5:1
	0230	2,5	2:1
5	0214	0,001	1:1
	0242	0,005; 0,2	1:1
6	0215	40	5:1
	0250	5	5:1
7	0230	2,5	2:1
	0250 N	5	5:1
	0250 Z	1	1:1
8	0250 N	5	5:1
	0250 Z	3	2:1



Figuur 5.4: Variabiliteit in K voor modellaag 1 na modelcalibratie.

Overige modelparameters:

- Aan de westelijke modelrand is de stijghoogte erg gevoelig t.a.v. veranderingen in de grondwatervoeding. Om deze reden werd de grondwatervoeding herberekend met WetSpass (cfr. paragraaf 3.4.4.) op basis van de actuele (berekende) grondwaterstand. Deze herberekende grondwatervoeding werd vervolgens gebruikt als nieuwe invoer voor het grondwatermodel (gemiddelde voor het volledige modelgebied: 255 mm/j; gemiddelde voor het Vlaamse deel van het modelgebied: 271 mm/j).
- Uit de waterbalans voor de zone met de Maasplassen blijkt dat er enorme volumes circuleren in dit gebied. Naast de complexe hydrologische situatie heerst hier grote onzekerheid omtrent de opgelegde vaste stijghoogte randvoorwaarde aan de rand van het modelgebied (cfr. paragraaf 3.3.3.). Ook zijn er geen gegevens omtrent de plassen voor handen. Vooral omtrent de plassen ten zuiden van het Lateraal Kanaal ontbreekt alle kennis opdat deze op een waarheidsgetrouwe manier in het model zouden kunnen ingebracht worden. Om deze reden, en mede doordat deze zone in het opzet van de huidige studie van weinig belang is, werd de oostelijke modelrand aan Nederlandse zijde gedeeltelijk opgeschoven tot aan het Lateraal Kanaal (Figuur 5.5); hier werd een rivier-randvoorwaarde ('river boundary') opgelegd. De aangrenzende vaste stijghoogte rand-voorwaarde aan de oostelijke modelrand diende hierdoor ook aangepast te worden. Gezien het grote peilverschil (ca. 7 m, cfr. sluizencomplex) werd ter hoogte van de overgang Maas-Lateraal Kanaal één "gewone cel" gedefinieerd, i.e. zonder opgelegde randvoor-waarde.
- Omwille van voorgaande en omdat de inbreng van de plassen in het model zeer sterk doorwerkt in de verhoudingen in de waterbalans (zie eerder) werd ervoor geopteerd om een rivier-voorwaarde ('river boundary') te definiëren ter hoogte van de plassen. Ook modeltechnische redenen steunen deze keuze; zo zou een vaste stijghoogte voorwaarde als het ware "voorrang" hebben op een rivier-voorwaarde waardoor, gezien de (onregelmatige) vorm en de omvang van de plassen, heel wat "riviercellen" zouden wegvallen. De optimale waarden voor de conductanties van de plassen zijn gebaseerd op een uniforme K-waarde (hydraulische geleidbaarheid sediment) van 0,01 m/d en een uniforme D-waarde (dikte sediment) van 1 m. Een uniforme diepte van 5 m werd aangenomen, i.e. "bodempeil = waterpeil – 5 m".
- De waarden voor de hydraulische karakteristiek (=doorlatendheid/breedte) van de breuken werden ingeschat en geoptimaliseerd via *trial & error* en variëren tussen 0 (t.h.v. breukzone Hoog van Bree en Feldbissbreuk, cfr. Figuur 3.4: grijs ingekleurde zone) en 0,01.
- Voor de drainconductantie in het mijnverzakkingsgebied werd op basis van het effectief totaal opgepompte volume in het jaar 2000 en de berekende waterbalans, via *trial & error*, een optimale waarde van 4.000 m²/d gevonden voor het maximale verzakkingsgebied en 2.000 m²/d voor elders in het verzakkingsgebied (cfr. Vlaamse Hydrologische Atlas - OC GIS-Vlaanderen, 2000).



Figuur 5.5: Lichte aanpassing van de modelgrens aan de oostrand van het gebied.

- De gebruikte invoergegevens voor de hydrografie zijn voor het overgrote deel afgeleid van de topografie (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.3). Hierbij werden op sommige locaties inconsistenties vastgesteld, bijv. oppervlaktewaterpeil (veel) te hoog in vergelijking met metingen in vlakbij gelegen peilbuizen/ peilputten, abrupte veranderingen in waterpeil en discontinu verloop stroomopwaarts/–afwaarts, etc.. Aan deze inconsistenties werd in de mate van het mogelijke verholpen.
- Uit de waterbalans blijkt dat er (te?) hoge fluxen zijn van de rivieren en kanalen naar het grondwater. Uit de ruimtelijke distributie van de afwijkingen tussen de gesimuleerde freatische grondwaterstand en de gemeten waarden komen geen waarneembare positieve of negatieve trends naar voor. De oorzaak ligt dus ofwel in de aangenomen oppervlakte-waterpeilen en/of in de aangenomen waarden voor de conductanties. Gezien volgens AMINAL – afdeling Water de aangenomen oppervlaktewaterpeilen vrij goed overeenkomen met de beschikbare oppervlaktewatermodellen (aan Vlaamse zijde), werd ervoor geopteerd om (enkel) de conductanties aan te passen. De conductanties (per eenheidslengte), Cond, voor de onbevaarbare waterlopen van 1^{ste} en 2^{de} categorie -zoals berekend uitgaande van een K-waarde van 0,1 m/d en een D-waarde van respectievelijk 0,5 m en 0,2 m- werden overal met een

factor 2 verlaagd (i.e. niet enkel in het deel van het modelgebied ten zuiden van de Feldbissbreuk, zie eerder), i.e. “Cond : 2”. De kanaalconductanties (per eenheidslengte), Cond, zoals berekend uitgaande van respectievelijk een K- en D-waarde van 0,01 m/d en 1 m, werden met een factor 10 verlaagd, i.e. “Cond : 10”.

De overeenkomst tussen de berekende en gemeten stijghoogten kan uitgedrukt worden onder de vorm van een calibratiecriterium, 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} (zie eerder). Door bovengenoemde aanpassing van de modelrand valt er één peilput overeenkomend met drie observatiepunten (L1: HCOV 0173, L6: HCOV 0215, L8: HCOV 0250) weg; in totaal werden aldus 248 observatiepunten (i.p.v. 251, cfr. Tabellen 5.1 en 5.2) gebruikt voor de berekening van de calibratiecriteria. De resultaten van de modelcalibratie zijn samengevat in Tabel 5.5. Hieruit kan het volgende afgeleid worden:

Voor elke modellaag is de gemiddelde afwijking < 0,5 m.

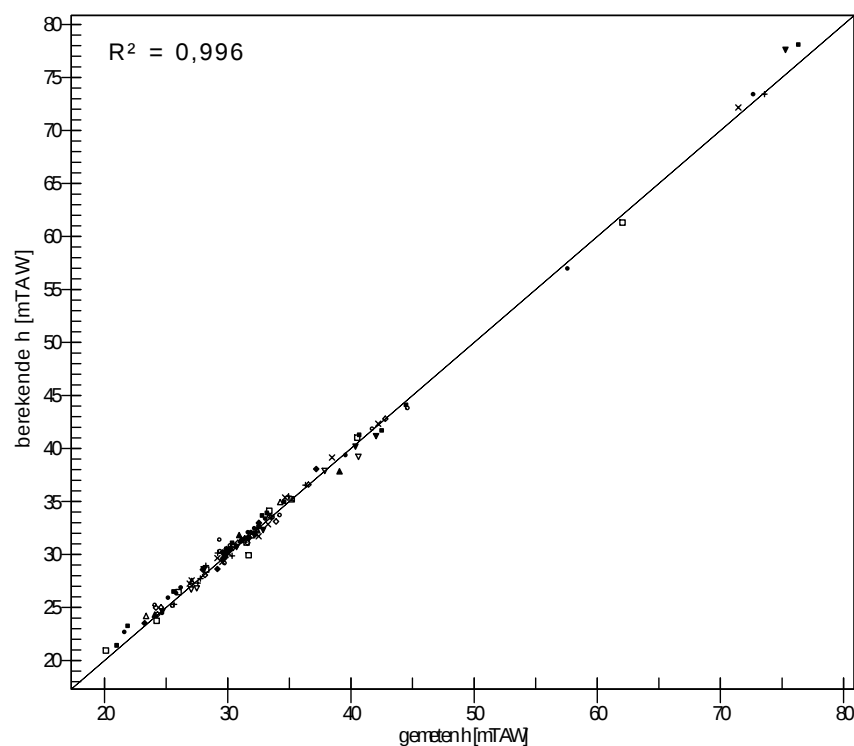
Voor elke modellaag is de gemiddelde absolute afwijking ≤ 1 m.

De gemiddelde afwijking en de gemiddelde absolute afwijking van het gehele model t.a.v. de metingen bedragen respectievelijk 0,11 m en 0,58 m.

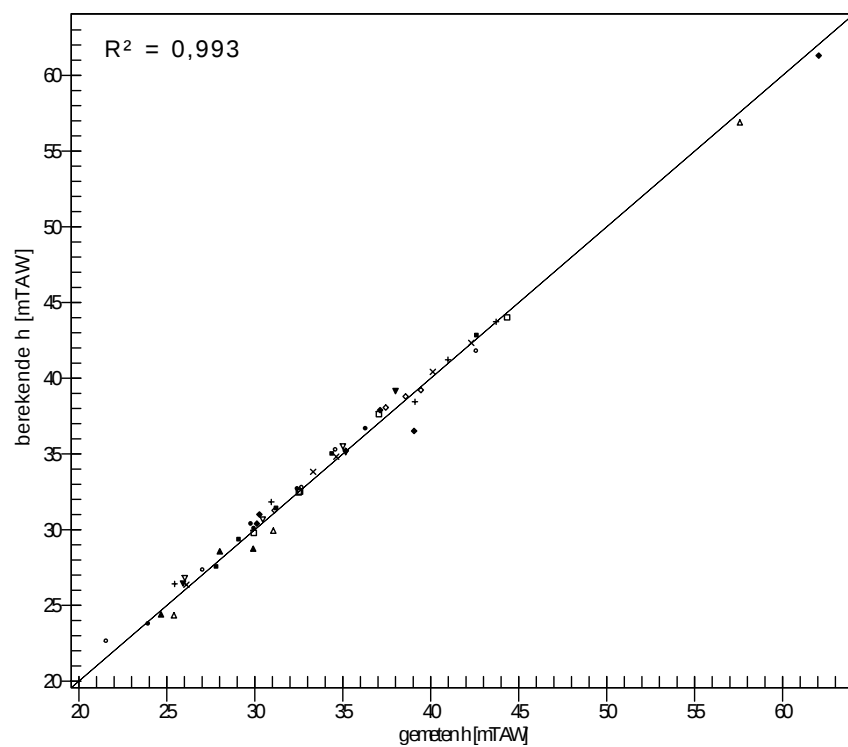
Tabel 5.5: Resultaten modelcalibratie.

Modellaag	Aantal obs.punten	Gemiddelde afwijking [m]	Gemidd. absolute afwijking [m]	Max. absolute afwijking [m]	RMSE [m]
1	127	0,14	0,47	2,31	0,62
2	52	0,08	0,48	2,53	0,65
4	16	0,40	0,81	2,36	1,04
6	37	0,03	0,87	4,32	1,31
7	6	-0,42	1,01	3,76	1,66
8	10	0,04	0,70	2,08	0,96

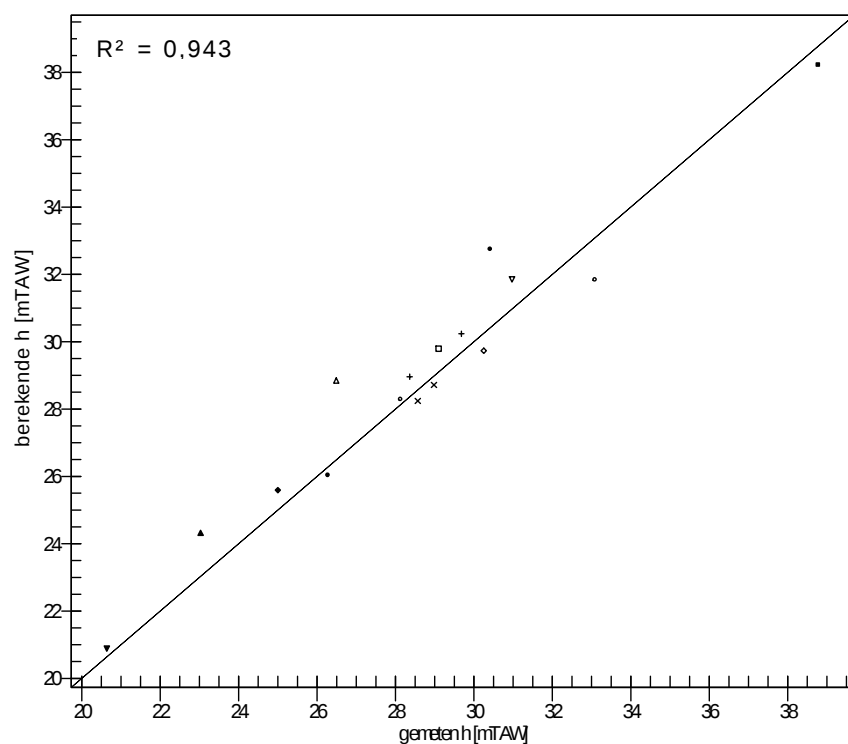
Figuren 5.6-5.11 geven de afwijking weer tussen de gemeten en gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogten voor achtereenvolgens modellaag 1, 2, 4, 6, 7 en 8. De calibratiecriteria voor laag 4 en laag 7, zoals gegeven in Tabel 5.5, en de berekende R^2 (Figuren 5.8 en 5.10) hebben enkel betrekking op het gedeelte ten noorden van de Feldbissbreuk, i.e. op respectievelijk de eenheid HCOV 0213 en HCOV 0230.



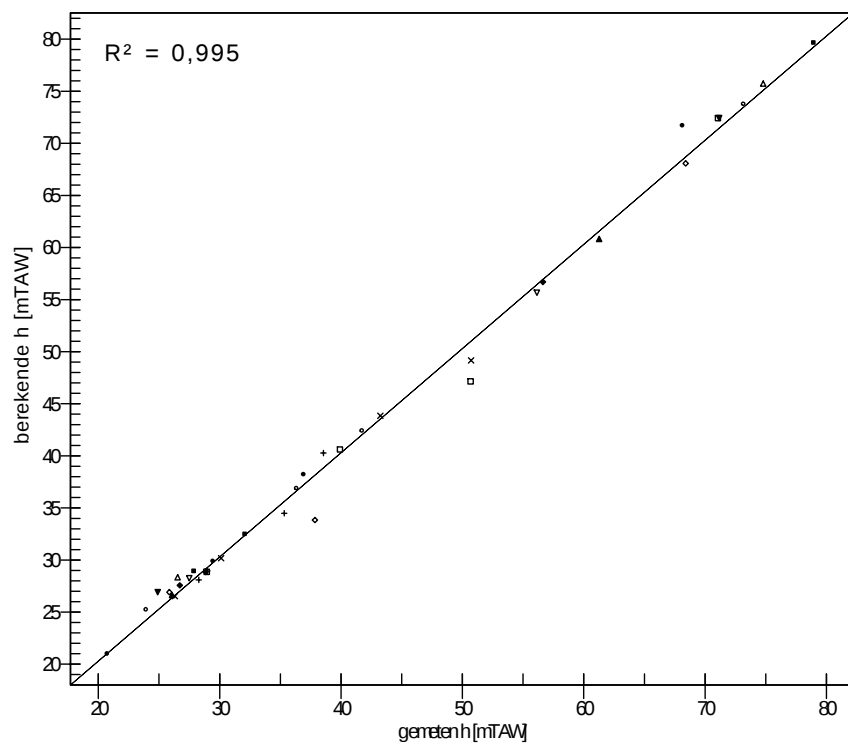
Figuur 5.6: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 1.



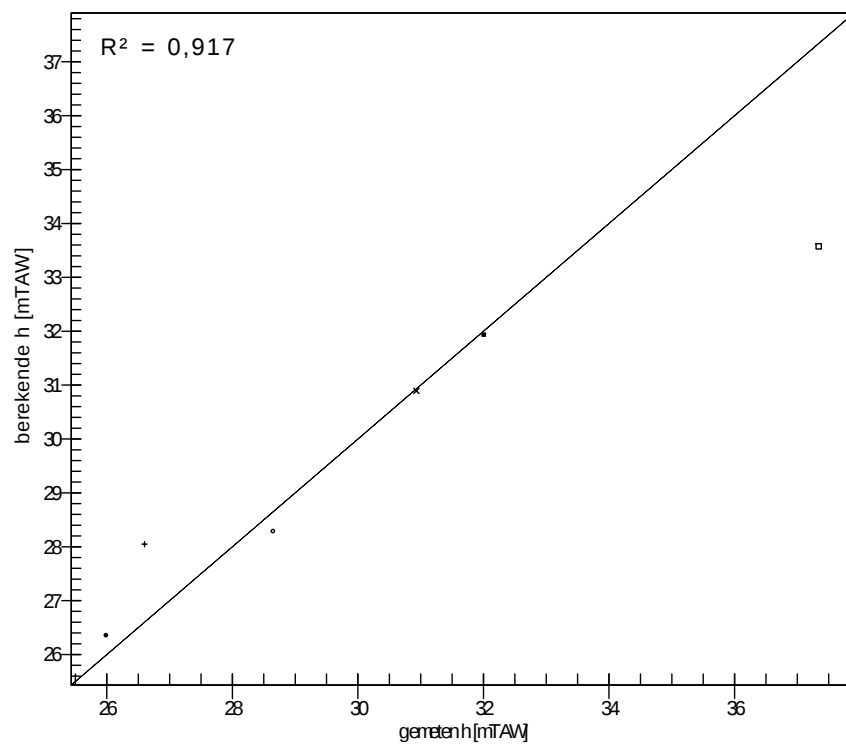
Figuur 5.7: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 2.



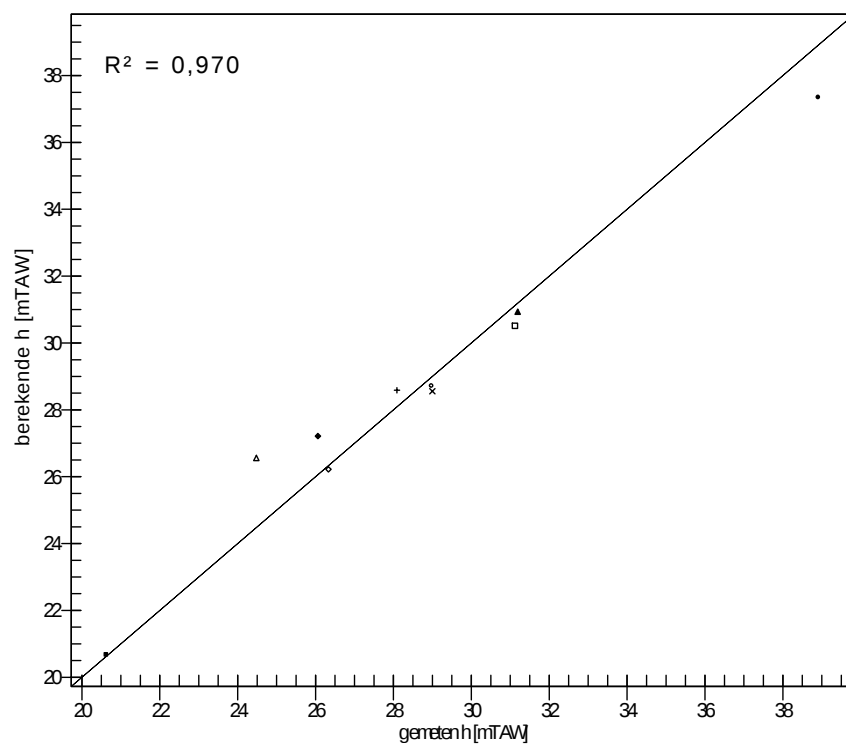
Figuur 5.8: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 4.



Figuur 5.9: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 6.



Figuur 5.10: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 7.



Figuur 5.11: Gemeten versus berekende stijghoogten voor modellaag 8.

Figuren 5.12-5.17 tonen de gesimuleerde stijghoogte voor achtereenvolgens de HCOV-eenheden 0100, 0211, 0213, 0215, 0230 en 0250, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden 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. Om te kunnen afleiden of er zones systematisch te hoog of te laag gesimuleerd zijn, wordt onderscheid gemaakt tussen een driehoekig symbool met de punt naar boven, dat erop wijst dat de gesimuleerde waarde te hoog is in vergelijking met de gemeten waarde, en een driehoekig symbool met de punt naar beneden, dat aangeeft dat de gesimuleerde waarde te laag is in vergelijking met de gemeten waarde. Voor de HCOV-eenheden 0212, 0214 en 0242 zijn geen observatiepunten beschikbaar en worden daarom geen stijghoogtekaarten getoond. Voor de eenheden HCOV 0230 en 0250 ten zuiden van de Feldbissbreuk werd de gemiddelde stijghoogte in respectievelijk modellaag 2, 3 en 4, en modellaag 6 en 7 beschouwd.

Uit de ruimtelijke distributie van de afwijkingen kan het volgende afgeleid worden (negatieve afwijking/ trend = gesimuleerde waarde te laag in vergelijking met gemeten waarde; positieve afwijking/ trend = gesimuleerde waarde te hoog in vergelijking met gemeten waarde):

- Voor de eenheid HCOV 0100: over het algemeen een zeer goede overeenkomst; de max. afwijking bedraagt 2,3 m. Er zijn geen waarneembare trends.
- Voor de eenheid HCOV 0211: over het algemeen een zeer goede overeenkomst; de max. afwijking bedraagt 2,5 m en doet zich voor in de omgeving van de centrale breukzone in het zuidelijk deel. De peilen worden in dit gedeelte te laag gesimuleerd (afwijking ≥ 1 m). Elders zijn de afwijkingen op drie locaties na (afwijking $\sim 1,2$ m) kleiner dan 1 m, zonder zichtbare trends.
- Voor de eenheid HCOV 0213: ter hoogte van twee putlocaties wordt een positieve afwijking van ca. 2,3 m waargenomen. Voor één ervan vormt de nabijheid van de breuk van Elen een mogelijke verklaring, wat de andere putlocatie betreft is het niet duidelijk wat de reden kan zijn voor de grote afwijking. Voor het overige zijn de afwijkingen op twee locaties na (afwijking $\sim 1,3$ m) kleiner dan 1 m. Er zijn geen waarneembare trends.
- Voor de eenheid HCOV 0215: de grootste afwijkingen doen zich voor nabij de breuken; de max. afwijking bedraagt 4,3 m. In het zuidelijk deel wordt de stijghoogte over het algemeen lichtjes te laag gesimuleerd.
- Voor de eenheid HCOV 0230: in de zone ten zuiden van de Feldbissbreuk is er over het algemeen een zeer goede overeenkomst tussen de gesimuleerde en gemeten waarden (afwijking < 1 m). In de zone ten noorden van de Feldbissbreuk doen de grootste afwijkingen zich voor ter hoogte van twee putlocaties in de buurt van de breuk van Hamont (afwijking $\sim 3,8$ m) en de breuk van Elen (afwijking $\sim 1,4$ m). De grootste afwijking doet zich voor ter hoogte van dezelfde putlocatie als in de eenheid HCOV 0215.
- Voor de eenheid HCOV 0250: de grootste afwijking (3,8 m) doet zich voor ter hoogte van een putlocatie vlakbij de Feldbissbreuk. In de zone ten zuiden van de Feldbissbreuk zijn de afwijkingen groter dan 1 m zowel positief als negatief. In de zone ten noorden van de

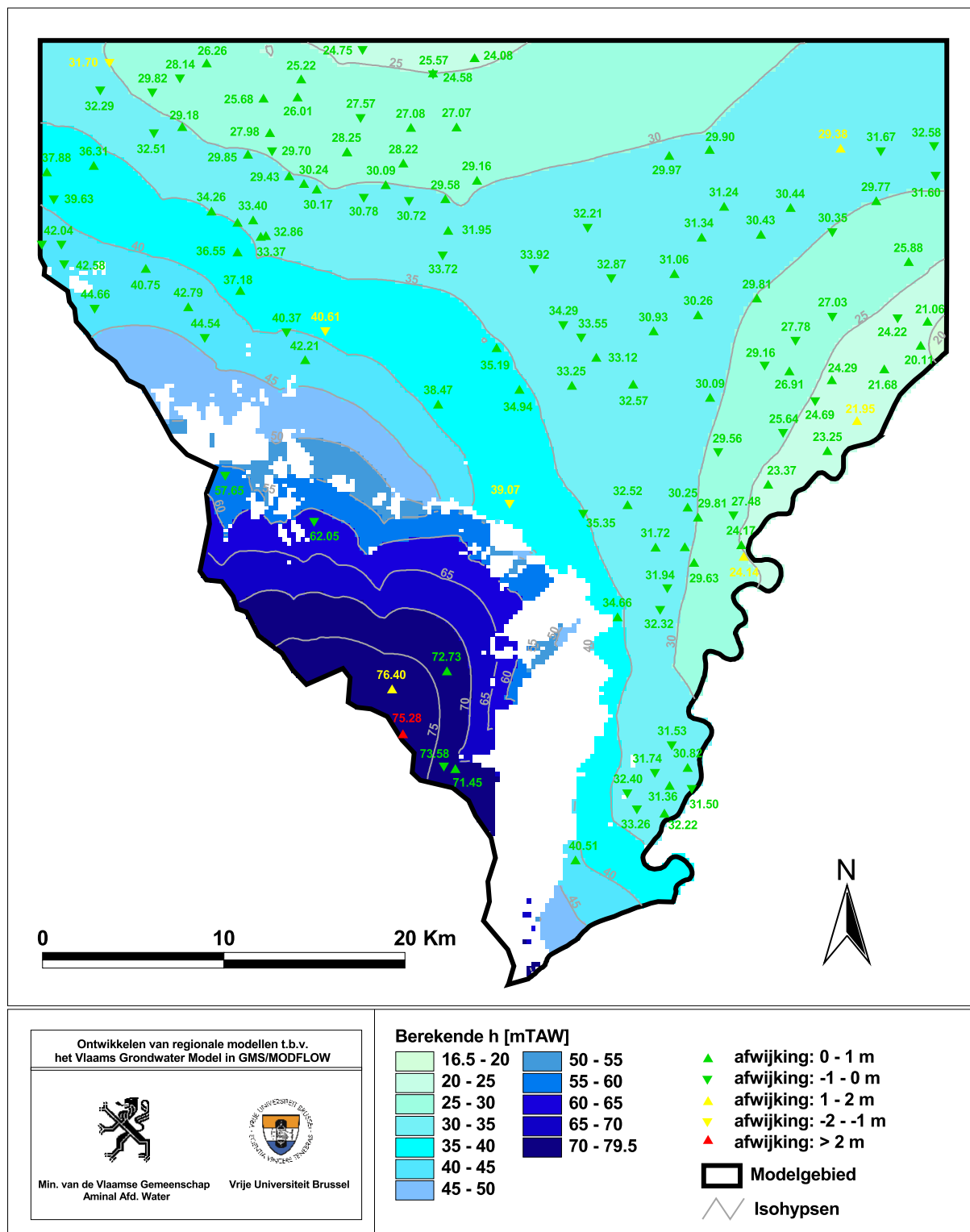
Feldbissbreuk doen zich (ook) geen zichtbare trends voor. De grootste afwijking (2,1 m) doet zich voor op een putlocatie nabij de breuk van Hamont in het uiterste noorden, waar ook in de eenheid HCOV 0215 een grote afwijking wordt vastgesteld.

De globale grondwaterstroming is gericht vanaf het Kempisch Plateau naar de lager gelegen Vlake van Bocholt (BE)/ Roerdalslenk (NL) en de Maasvallei. In de dieperliggende lagen (HCOV 0230: Pleistoceen en Pliocene Aquifersysteem; HCOV 0250: Mioceen Aquifersysteem) is de invloed van de breuken op het stromingspatroon en de stijghoogte duidelijk merkbaar. Nabij sommige breukzones wordt het grondwater opgestuwd (extreem hoge stijghoogten worden gesimuleerd), doordat het water de breuk moeilijk of niet kan passeren (cfr. paragraaf 3.3.2).

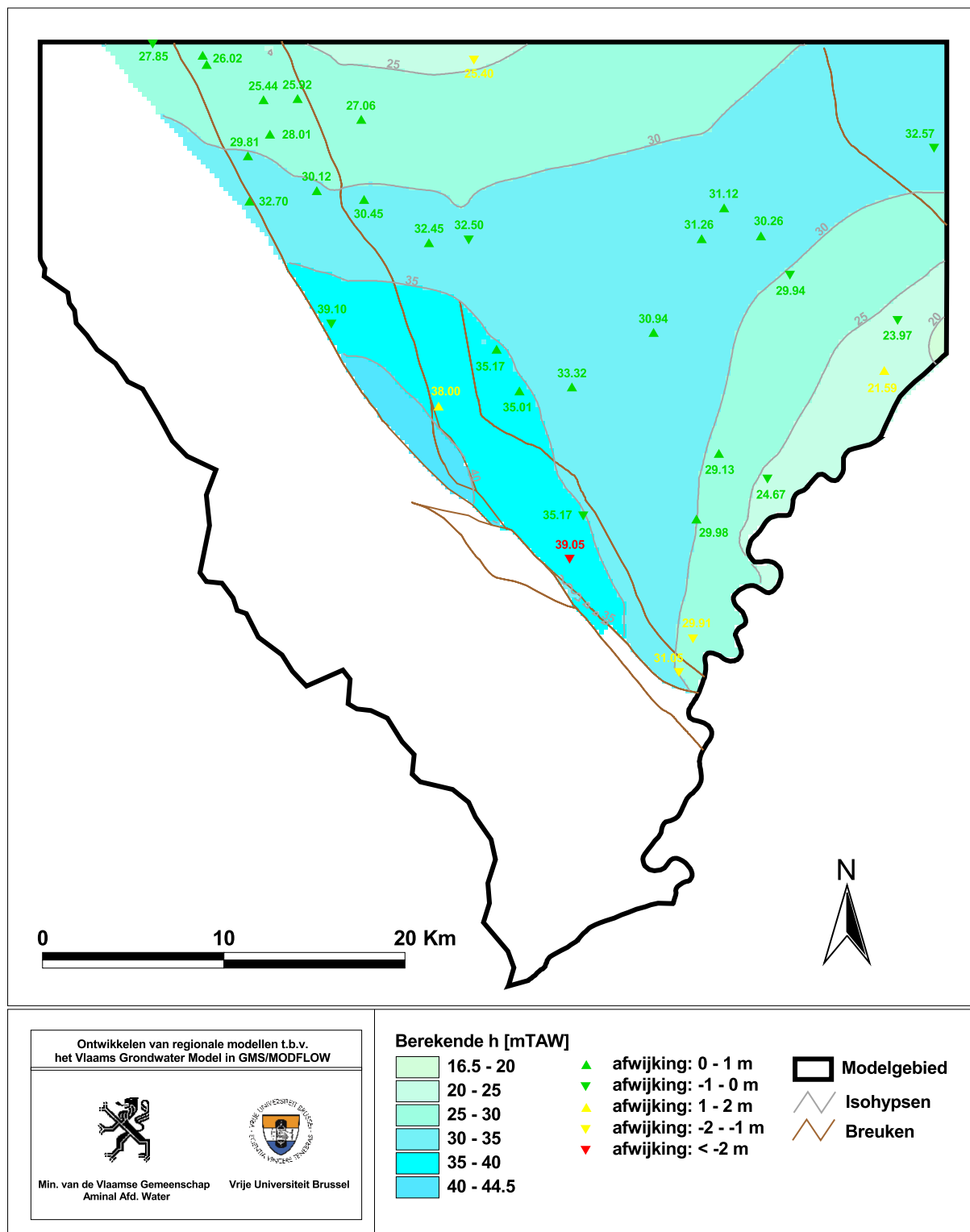
Uit de waterbalans kan afgeleid worden dat de belangrijkste toevoer komt van de grondwatervoeding (77,8%), gevolgd door de vaste stijghoogte randvoorwaarden (11,3%) en de waterlopen (10,9%). De afvoer gebeurt voornamelijk via de waterlopen (46,2%), gevolgd door de vaste stijghoogte cellen (24,8%), de winningen (18,1%) en de drains (10,9%).

Figuur 5.18 toont de diepte onder maaiveld van de freatische grondwatertafel, bepaald op basis van het gebiedsdekkende DHM dat een combinatie is van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (OC-GIS Vlaanderen, 2004) en het Actueel Hoogtebestand Nederland (Rijkswaterstaat, 2000), cfr. paragraaf 3.3.4. De blauwe zones zijn zogenaamde 'flooded cells', i.e. de door MODFLOW berekende grondwaterstand is hier (rekenkundig) hoger dan de topografie. Zoals verwacht zijn de meeste van deze "overstroomde" zones terug te vinden ter hoogte van de rivierlocaties aan Nederlandse zijde (stuwpeil). Ook aan Vlaamse zijde zijn er "overstroomde" zones ter hoogte van een aantal rivierlocaties (bijv. Abeek). Echter, voorzichtigheid is geboden bij de fysische interpretatie van het concept van de 'flooded cells'. MODFLOW berekent de stijghoogte in het middelpunt (horizontaal en vertikaal) van een cel, die dan als de gemiddelde stijghoogte in die cel wordt beschouwd. Het kan dus zijn dat er in het middelpunt van de cel een overdruk heerst, echter dit betekent niet noodzakelijk dat het grondwater fysisch tot boven het maaiveld uitstijgt. Het concept van de 'riverbed conductance' in MODFLOW (RIVER-module) is dan ook niet geheel toereikend om de interactie van ondiepe waterlopen met een aquifer te simuleren. Meerbepaald gaat de aanname van Dupuit nabij ondiepe waterlopen niet op en klopt de door het regionaal grondwatermodel berekende stijghoogte hier niet, in de zin dat deze niet rechtstreeks te verifiëren is met een (ondiepe) peilbuis (zie ook: Maas, 2003). Voor het simuleren van de oppervlaktewater-grondwater interactie is een veel grotere verticale resolutie nodig en zijn lokale modellen vereist. Een analoog probleem doet zich voor met het DRAIN-pakket, in dat de berekende grondwaterstand meer dan gewenst boven het drainniveau uitstijgt, cfr. 'flooded cells' ter hoogte van niet-rivierlocaties. Om deze reden ontwikkelde Batelaan & De Smedt (2004) het SEEPAGE-pakket, waarmee een absolute bovenrand aan het grondwatersysteem kan opgelegd worden, zie ook

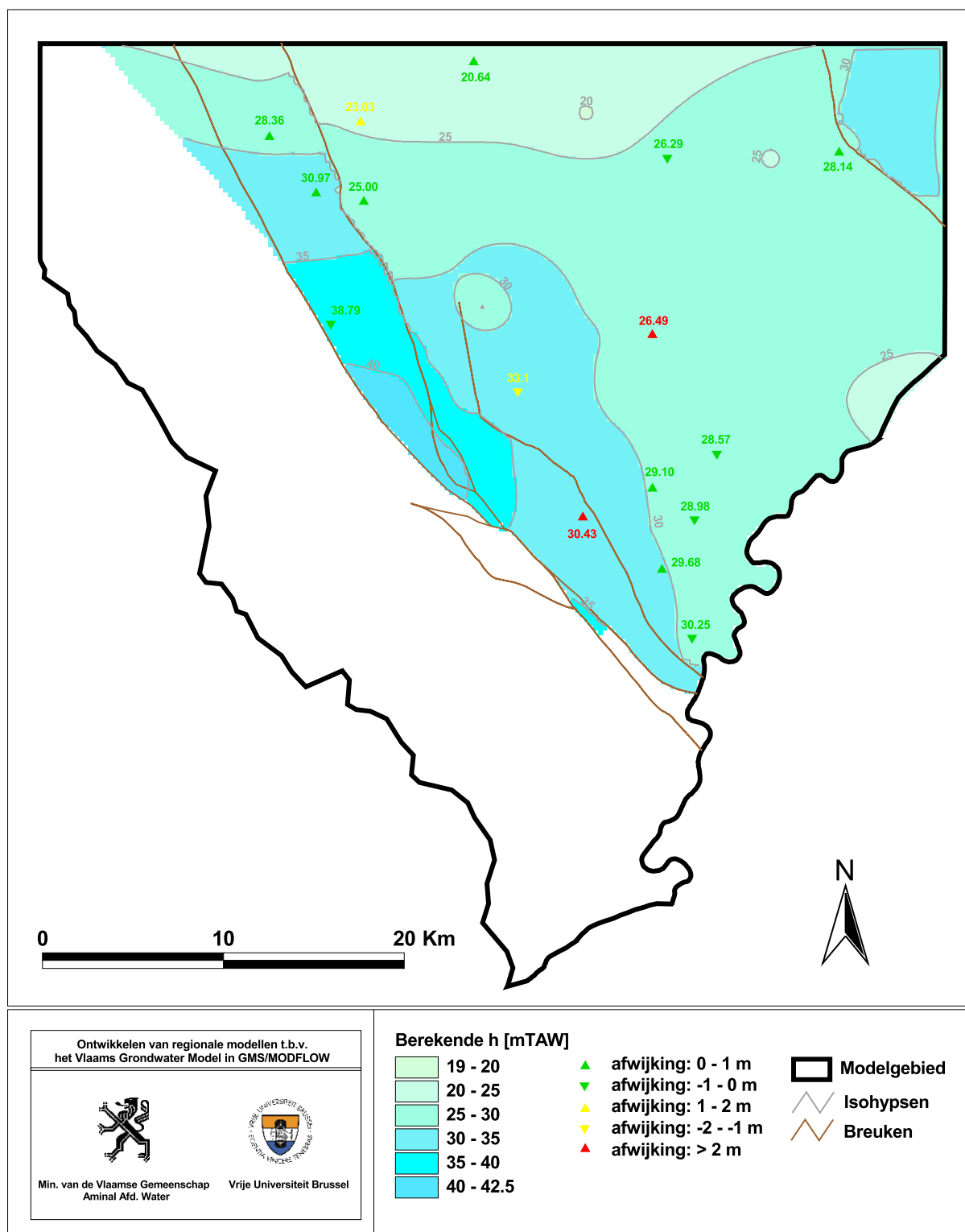
Deelopdracht 1, paragraaf 2.4. Los van voorgaande vormen de (invoer-)gegevens en de gebruikte aannamen tevens een beperking (zie verder, Hoofdstuk 6 “Bemerkingen”).



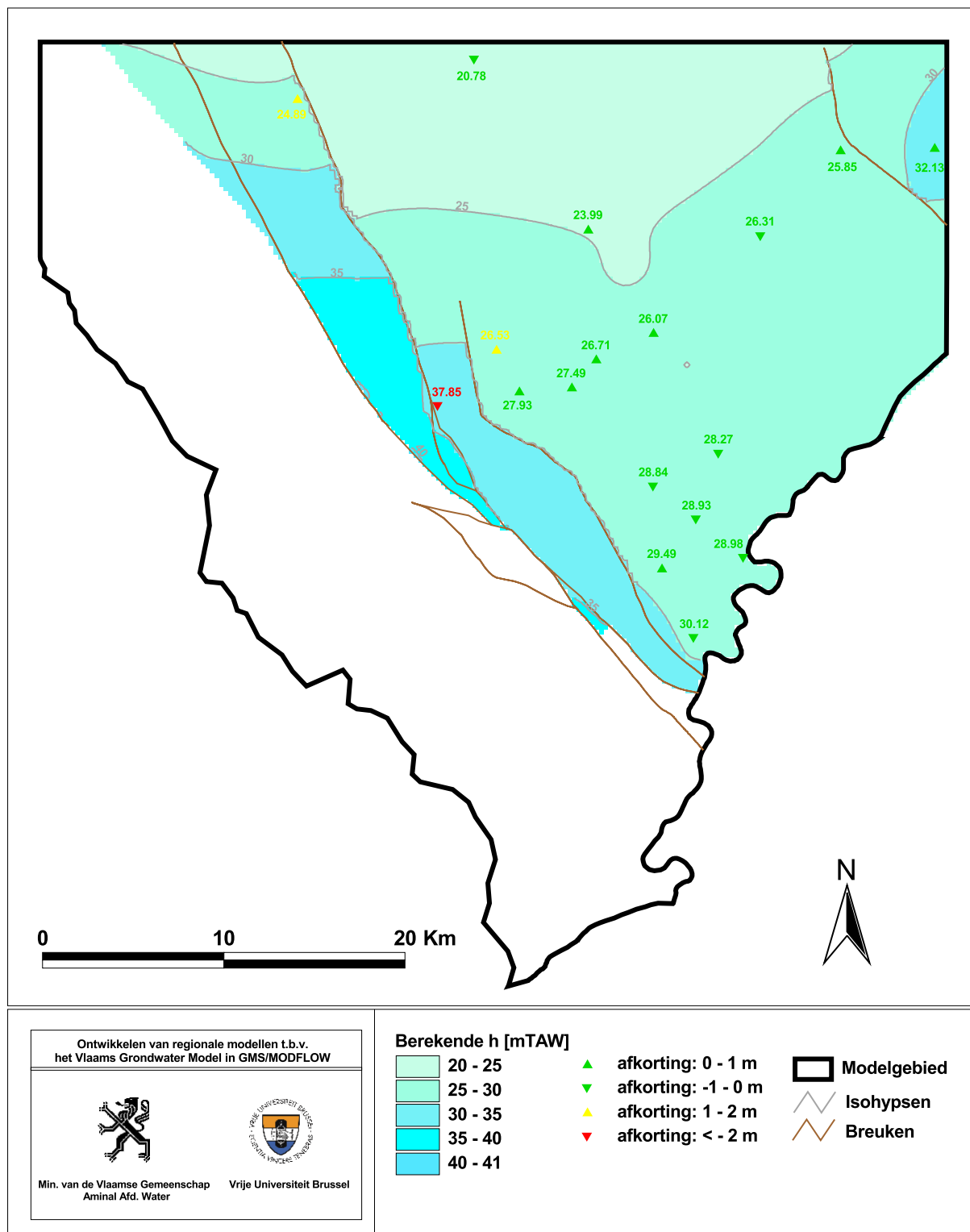
Figuur 5.12: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0100, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking weergeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.



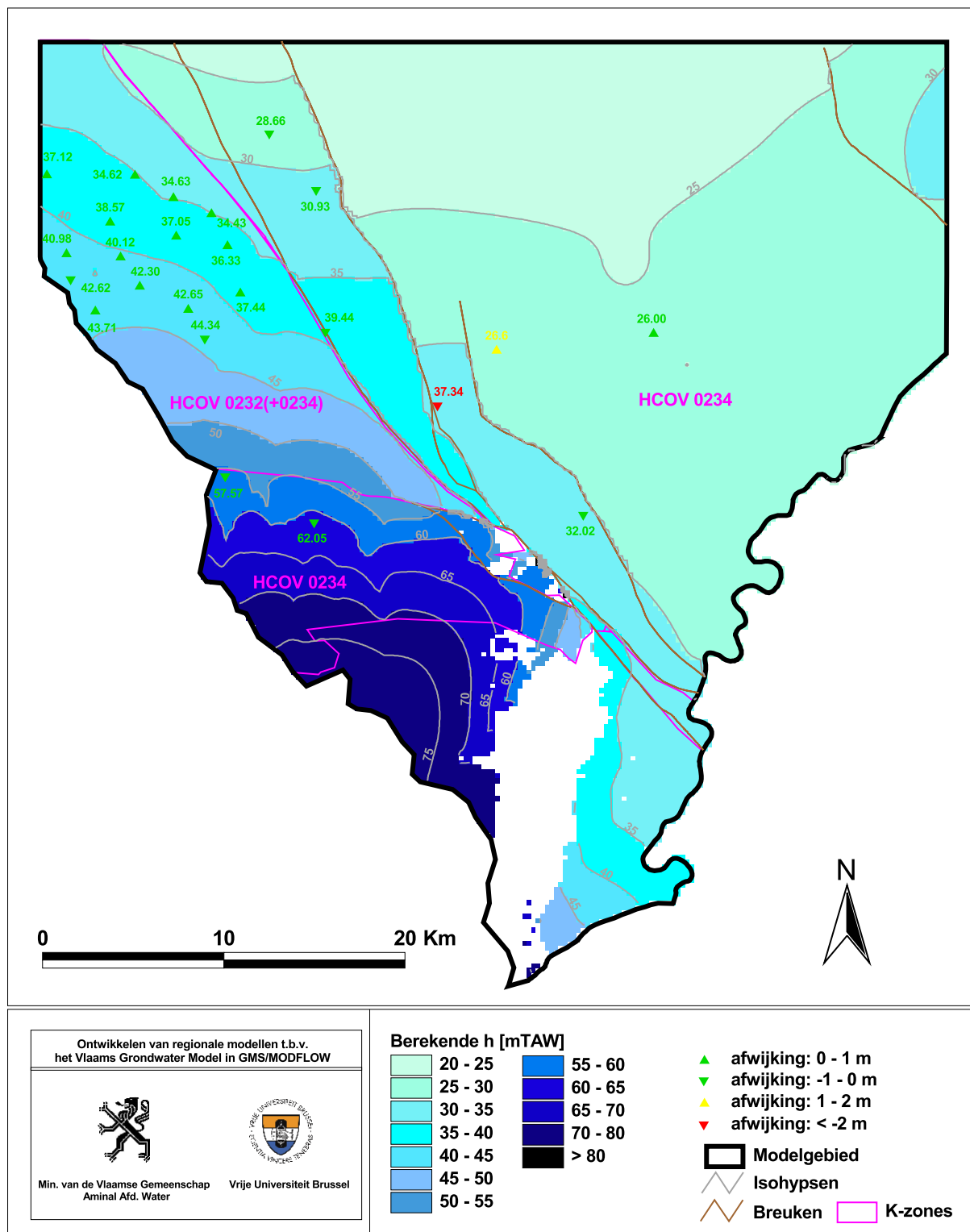
Figuur 5.13: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0211, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.



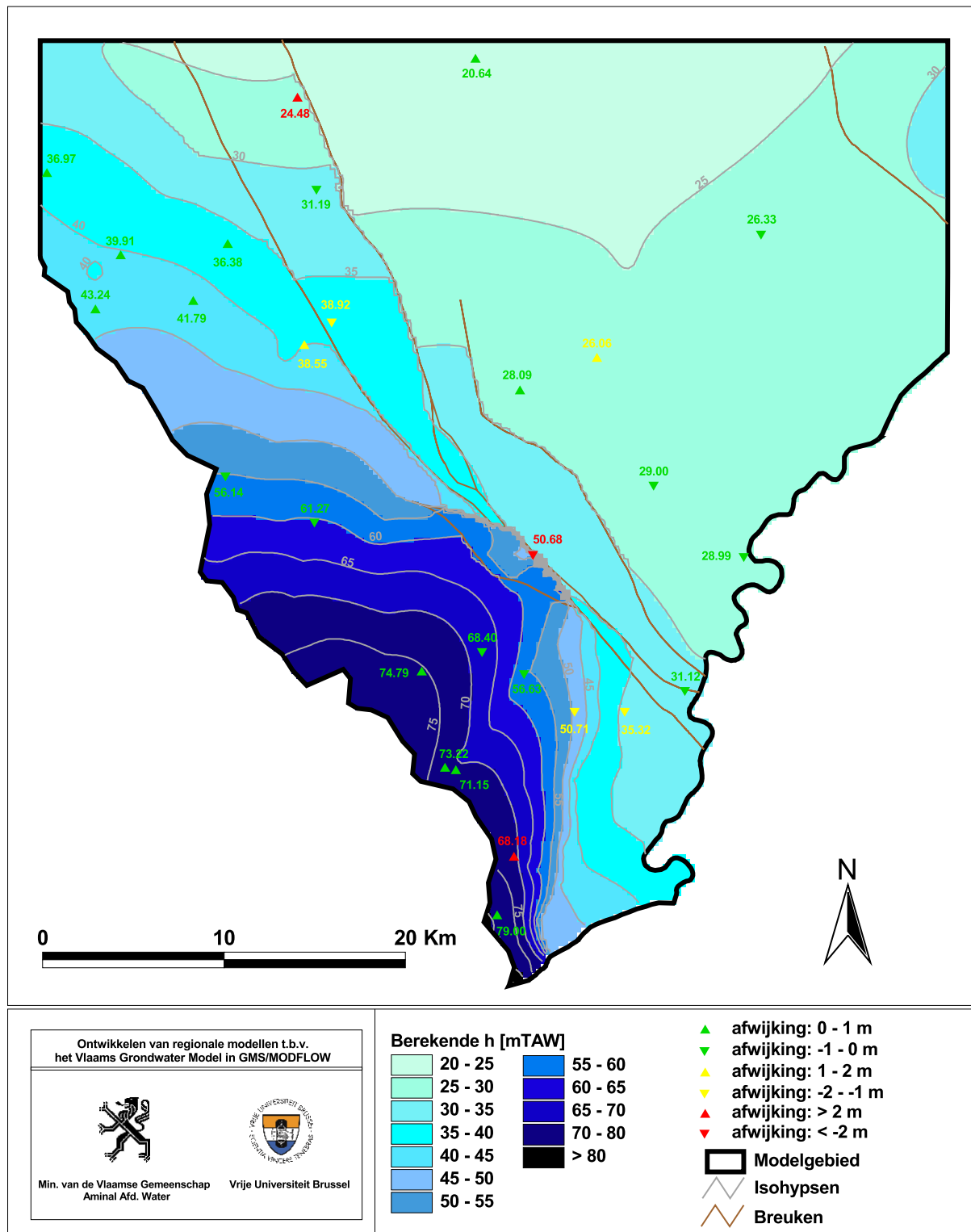
Figuur 5.14: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0213, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.



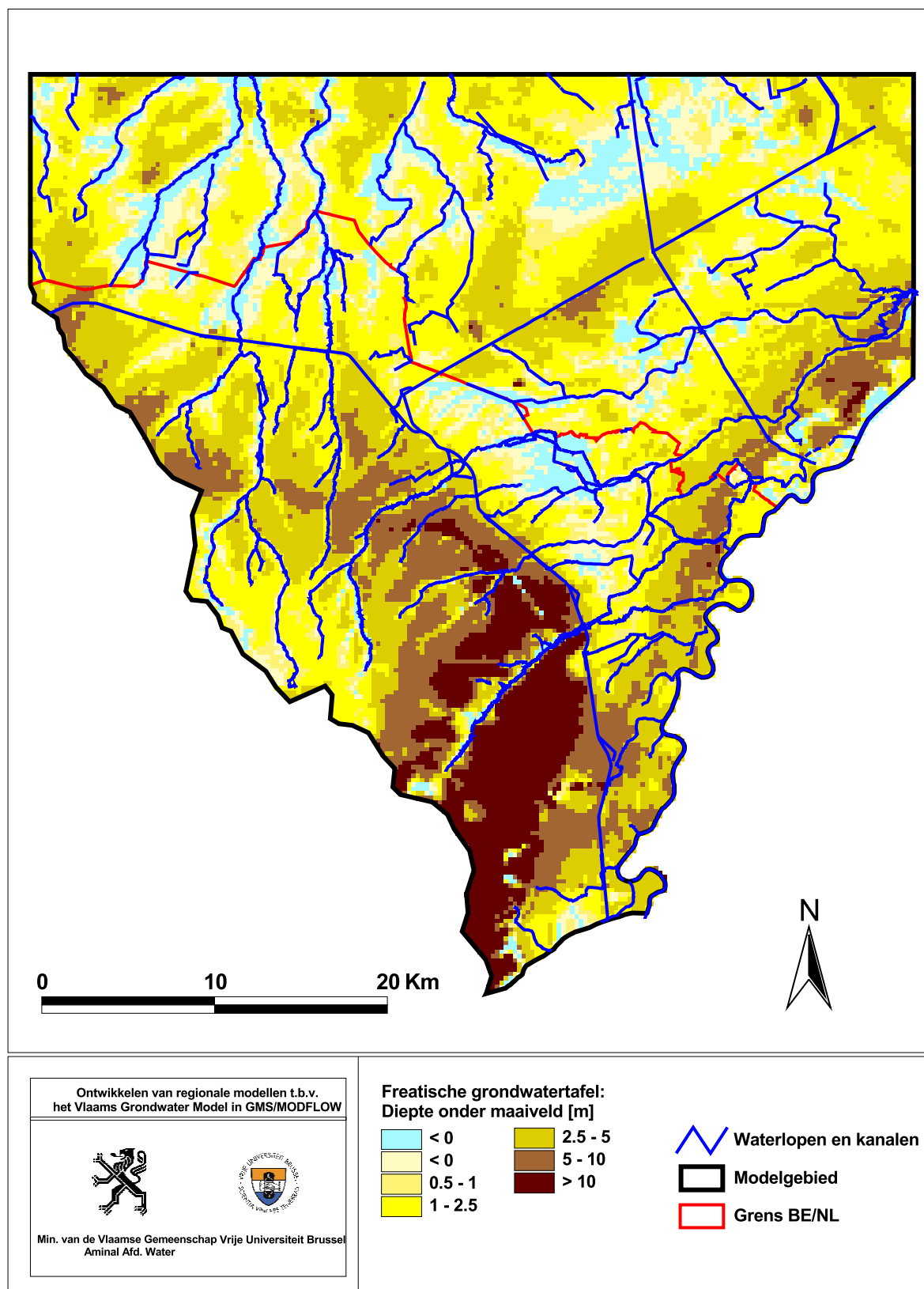
Figuur 5.15: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0215, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.



Figuur 5.16: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0230, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.



Figuur 5.17: Gesimuleerde (gecalibreerde) stijghoogte voor de eenheid HCOV 0250, tesamen met de gemeten stijghoogten weergegeven als puntwaarden met een kleurcode die de grootte van de afwijking aangeeft: groen: < 1 m; geel: 1 - 2 m; rood: > 2 m. Een driehoekig symbool met de punt naar boven/beneden geeft aan dat de gesimuleerde waarde te hoog/laag is in vergelijking met de gemeten waarde.



Figuur 5.18: Diepte onder maaiveld van de freatische grondwatertafel (na calibratie).

Bemerkingen

- De modelgrens in het zuiden betreft slechts ten dele een fysische grens (het Quartair loopt over de grens door) en de noordelijke modelgrens is volledig “artificieel”. Dit vormt een beperking voor het grondwatermodel, temeer ook omdat het gebrek aan voldoende meet-gegevens tot onzekerheid in de opgelegde randvoorwaarden leidt.
- Uit een vergelijking van de maaiveldhoogte ter hoogte van de putlocaties aan Vlaamse zijde, zoals gegeven in het MS Access gegevensbestand, met het 25x25 m DHM raster (OC GIS-Vlaanderen, 2004) blijkt dat op sommige locaties het verschil tussen beiden tot enkele meters kan oplopen. De verschillen zijn zowel positief als negatief. De grootste verschillen betreffen weliswaar peilputten van meetnet 5 en 7, die niet beschouwd werden bij de calibratie. Echter, voor vijf putten van meetnet 1 -die wel als observatiepunt werden opgenomen- bedraagt het onderlinge verschil ook meer dan 0,5 m, en voor vijf andere putten meer dan 1 m.
- Uit een vergelijking van de maaiveldhoogte ter hoogte van de putlocaties aan Nederlandse zijde (cfr. gegevensbestand) met het 25x25 m AHN raster (Rijkswaterstaat, 2000) blijkt dat op tal van locaties significante verschillen (tot 5 m) bestaan tussen beiden. Op 47 put-locaties bedraagt het onderlinge verschil (zowel positief als negatief) meer dan 1 m. M.a.w., indien het referentiepeil afgeleid is van de gegeven maaiveldhoogte (in het gegevens-bestand) dan vereist dit nader onderzoek. Volgens de kwaliteitscodering (cfr. DINO-loket) zouden de betreffende peilmetingen echter “goed/betrouwbaar” zijn, en dus werden geen peilputten geëxcludeerd voor de calibratie.
- De gebruikte invoergegevens voor de hydrografie zijn voor het overgrote deel gebaseerd op aannamen (cfr. Deelopdracht 1, paragraaf 2.3). Hierdoor hoeft het niet te verbazen dat op sommige locaties sterke afwijkingen van de realiteit worden verkregen, zoals te zien is uit meetgegevens van nabijgelegen peilbuizen. Aan Nederlandse zijde werden de invoer-gegevens voor een groot deel afgeleid op basis van het AHN, m.a.w. hetzelfde 25x25 m raster dat op sommige locaties duidelijk afwijkt van de gegeven maaiveldhoogten in het gegevensbestand van de Nederlandse peilputten (zie hierboven). Hetzelfde geldt voor het drainagepeil.
- Het drainagepeil en -indien geen gegevens beschikbaar- het waterpeil/bodempeil van de rivieren werden afgeleid op basis van het gebiedsdekkend DHM, dat een combinatie is van het Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen (OC-GIS Vlaanderen, 2004) en het Actueel Hoogte-bestand Nederland (Rijkswaterstaat, 2000), cfr. paragraaf 3.3.4. Voor de top van de bovenste modellaag in GMS werd het DHM uit de HCOV-kartering in combinatie met het AHN gebruikt, om mogelijke inconsistenties t.a.v. de onderliggende geologische basissen te vermijden. Het DHM uit de HCOV-kartering is minder nauwkeurig, waardoor het dus mogelijk is dat in GMS op sommige plaatsen aan Vlaamse zijde cellen verkeerdelijk als ‘flooded’ (“overstroomd”) worden aangegeven, of omgekeerd.
- Een nauwkeurige hydrogeologische karakterisering van breuken vereist een uitgebreide set van gedetailleerde metingen van zowel de stijghoogte als de doorlatendheid, bij voorkeur aangevuld

met geochemische en geothermische gegevens. De enorme hoge kosten die hiermee gepaard gaan, verklaart de schaarse kennis omtrent breuksystemen tot op de dag van vandaag. Om deze reden bestaat er in grondwatermodellen veelal een grote onzekerheid omtrent breuken en hun eigenschappen.

Referenties

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

Batelaan, O., De Smedt, F. (2001). WetSpas: 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.

Batelaan, O. and De Smedt, F., 2004, SEEPAGE, a new MODFLOW DRAIN Package. Ground Water, 42, 4, p. 576-588.

Bense, V.F. (2002). Hydrogeologische karakterisering van breukzones in Zuidoost-Nederland. Stromingen, 8, 3, p. 17-30.

Bense, V.F. (2004). The hydraulic properties of faults in unconsolidated sediments and their impact on groundwater flow. Academisch proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam, 143 p.

Brigham Young University, Utah, USA, Environmental Modeling Research Laboratory, 2003: GMS 5.0 Tutorials.

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

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.

Hsieh, P.A., Freckleton, J.R. (1993). Documentation of a computer program to simulate horizontal-flow barriers using the U.S. Geological Survey's modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Open-File Report 92-477, USGS, Sacramento, California, 32 p.

Maas, K. (2003). Ondiepe waterlopen in MODFLOW. Stromingen, 9, 3, p. 37-45.

McDonald, M.G., 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, 586 p.

Meyus, Y., Woldeamlak, S.T., Batelaan, O., De Smedt, F. (2004). Opbouw van een Vlaams Grondwatervoedingsmodel: Eindrapport. Rapport in opdracht van AMINAL, afdeling Water, Brussel, 78 p.

Meyus, Y., Adyns, D., Severyns, J., Batelaan, O., De Smedt, F. (2004). Ontwikkeling van regionale modellen ten behoeve van het Vlaams Grondwater Model (VGM) in GMS/MODFLOW – Perceel 1: Het Centraal kempisch model, Deelrapport 1: Basisgegevens en conceptueel model. Onderzoeksopdracht Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer, AMINAL, afdeling Water: 131 p. + bijlagen + CD-rom.

Royal Haskoning (2003). MER Grensmaas 2003 - Achtergronddocument 3: Grondwater, studie in opdracht van De Maaswerken en de Provincie Limburg (NL), 79 p. + bijlagen.

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.

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

Digitale gegevenssets

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

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

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

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

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

