

---

# Berekening van verzadigde grondwaterstroming met het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium

Bart Goes en Jarno Verkaik<sup>1</sup>

---

## 1 Inleiding

Een belangrijk doel van het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) is het beantwoorden van landelijke beleidsvragen (zie het artikel 'NHI? NHI!', elders te vinden in deze uitgave van Stromingen). Voor de ontwikkeling van het model is een gefaseerde aanpak gekozen, waarbij in eerste instantie zoveel mogelijk aansluiting is gezocht bij de tot nu toe gebruikte landsdekkende grondwatermodellen. Deze modellen zijn LGM (Landelijk Grondwater Model van Planbureau voor de Leefomgeving) en NAGROM (Nationaal GRondwater Model van Rijkswaterstaat Water Dienst). Voor de vergelijkbaarheid met deze modellen is er in eerste instantie voor gekozen om de ondergrond te verdelen in vier modellagen.

In de periode van april 2006 tot en mei 2007 (NHI Fase 1) lag de nadruk op de onderlinge afstemming tussen de participerende kennisinstituten en de technische realisatie van de koppeling tussen drie verschillende modelleercodes: MODFLOW (de verzadigde grondwaterstroming), MetaSWAP (de onverzadigde zone) en MOZART/DM (de oppervlaktewater verdeling). Voor meer informatie over MetaSWAP en MOZART/DM, zie respectievelijk de artikelen 'Conceptualisatie en parameterisatie van landgebruik, bodem, berekening en buisdrainage in het NHI' en 'Oppervlaktewater in het NHI', elders in deze uitgave van Stromingen. De wensen voor: het inbrengen van nieuwe data (o.a. REGIS II.0), reproduceerbaarheid van de modelinvoer en aansluiting bij de werkwijzen voor regionale modellen, heeft geresulteerd in de start van NHI Fase 1+. Van juni 2007 tot oktober 2008 is er hard gewerkt om het NHI model vanaf de basis op te bouwen met de best beschikbare data van de participerende kennisinstituten.

In dit artikel wordt beschreven hoe het verzadigde grondwatermodel is opgebouwd en hoe de ondergrond is geschematiseerd en geparametriseerd. Dit artikel is gebaseerd op de NHI rapportage, welke te downloaden is vanaf de webpagina [www.nhi.nu](http://www.nhi.nu).

---

<sup>1</sup> Bart Goes en Jarno Verkaik zijn werkzaam bij Deltares, Bodem en Grondwatersystemen. Correspondentie: [jarno.verkaik@deltares.nl](mailto:jarno.verkaik@deltares.nl)

## 2 Basiselementen MODFLOW

### 2.1 Inleiding

De verzadigde grondwatervergelijking wordt binnen het NHI model opgelost met de eindige volume<sup>2</sup> modelcode MODFLOW. MODFLOW (MODular groundwater FLOW) is een publiekdomein code en bestaat uit een verzameling packages (modules) die door de USGS zijn en worden ontwikkeld ([http://water.usgs.gov/software/lists/ground\\_water](http://water.usgs.gov/software/lists/ground_water)). Met deze packages kunnen bijvoorbeeld de ontwateringsmiddelen worden gemodelleerd. Ruim twintig jaar biedt MODFLOW de modelleur een flexibel platform waar functionaliteiten naar eigen behoeften aan kunnen worden toegevoegd of aangepast. Dit is een belangrijke reden waarom MODFLOW wereldwijd veel wordt gebruikt.

In paragraaf 2.2 zullen kort de basiskenmerken van het MODFLOW model besproken worden, gevolgd door de beschrijving van enkele gebruikte packages in paragraaf 2.3.

### 2.2 Basiskenmerken MODFLOW

- Het NHI model berekent verzadigde grondwaterstroming voor Nederland, met uitzondering van de Waddeneilanden en Zuid-Limburg (Figuur 1). Het grondwatermodel bestaat uit vier quasi-3D modellagen (Figuur 2) een deklaag, welke zowel watervoerend als scheidend is;
- drie watervoerende pakketten (WVP) of aquifers, met uitsluitend horizontale grondwaterstroming;
- twee slecht doorlatende lagen (SDL) of aquitards, welke de watervoerende lagen scheiden, met uitsluitend verticale grondwaterstroming;
- een ondoorlatende hydrogeologische basis.

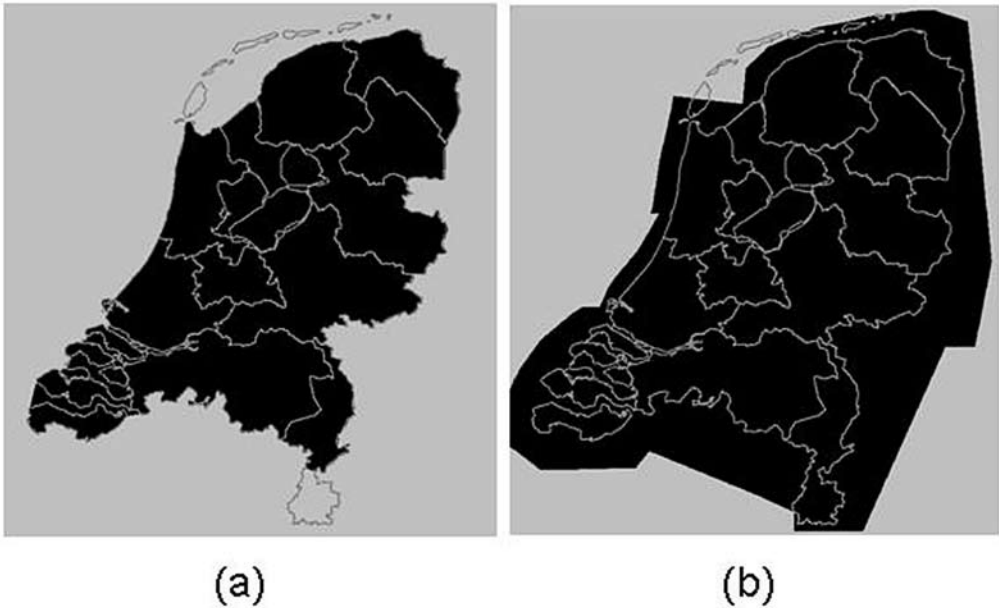
Er is bewust voor vier modellagen gekozen door de NHI projectgroep om a) de vergelijking met de parameters van de voorloper van het NHI mogelijk te maken en b) door de beperkte rekencapaciteit.

De laagindeling is grotendeels gebaseerd op een vereenvoudiging van REGIS II.0 (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem). In MODFLOW is de ruimtelijke variatie in de diktes van de watervoerende pakketten verdisconteerd in het doorlaatvermogen en de diktes van de scheidende lagen in de weerstand tussen de watervoerende pakketten. In Hoofdstuk 3 wordt uitvoerig ingegaan op de gevolgde werkwijze voor het maken van de ondergrond invoer voor MODFLOW.

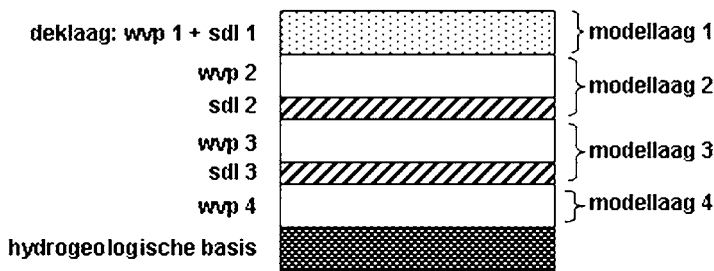
Elke modellaag kent 1200 kolommen en 1300 rijen van rekencellen met elk een afmeting van 250 bij 250 m. Van de cellen die buiten het rekengebied liggen wordt geen stijghoogte berekend, dit zijn inactieve cellen. In de freatische laag zijn alle cellen binnen de landsgrenzen actief (Figuur 2a) en de diepere modellagen kennen ook buiten Nederland actieve cellen (Figuur 2b). In Rijksdriehoek coördinaten bestrijkt het NHI model de X-coördinaten 0 tot 300 km en Y-coördinaten 300 tot 625 km.

---

<sup>2</sup> In de literatuur wordt MODFLOW ten onrechte een eindige differentie methode genoemd. Feitelijk wordt niet de differentiaal- maar de integraalvorm van de grondwatervergelijking opgelost. Het resulterende eindige volume schema verschilt in eigenschappen qua nauwkeurigheid en flexibiliteit.



**figuur 1:** Actieve (zwart) en inactieve rekencellen (lichtgrijs) van het NHI model. De overgang actief-inactief is de modelrand. (a): modellaag 1 met een dichte rand; (b): modellagen 2 t/m 4 met als rand een vaste stijghoogte.



**figuur 2:** Verticale modelschematisatie binnen MODFLOW (SDL: slecht doorlatende laag; WVP: watervoerend pakket).

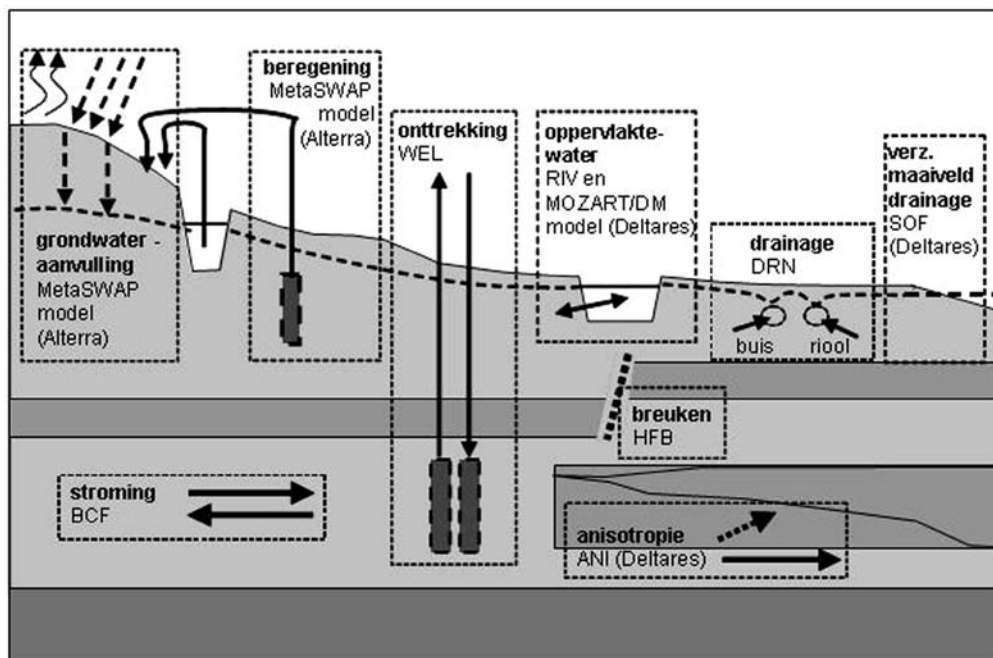
De randvoorwaarden voor de modelgrenzen (overgang actief-inactief) zijn verschillend per modellaag:

- *Modellaag 1:* er is aangenomen dat stroming (het doorlaatvermogen) over de landsgrens te verwaarlozen valt (een dichte ‘Neumann’ rand).
- *Modellaag 2-4:* vaste stijghoogte rand (‘Dirichlet’ rand). Hiervoor zijn berekende stationaire stijghoogten uit het NAGROM model gebruikt. Verder is voor de actieve cellen in het buitenland en het kustgebied informatie uit het NAGROM model gebruikt om Nederland van randvoorwaarden te voorzien.

### 2.3 Beschrijving MODFLOW packages

Figuur 3 toont schematisch welke MODFLOW packages zijn gebruikt en de koppeling met MetaSWAP en MOZART/DM. De packages RIV (oppervlaktewater), DRN (voornamelijk buisdrainage) en SOF (verzadigde maaiveld drainage) worden gebruikt om 'Cauchy' randvoorwaarden (stijghoogte afhankelijke fluxen) aan het model op te leggen. Hiermee kan de interactie tussen de drainagemiddelen en/of de oppervlaktewateren in het topsysteem en het grondwater eronder worden gemodelleerd. De WEL package wordt gebruikt om put onttrekkingen en infiltraties te modelleren ('Neumann' rand, constante flux).

Hieronder worden enkele packages kort toegelicht. Een uitgebreide beschrijving is terug te vinden in de desbetreffende NHI deelrapporten.



figuur 3: MODFLOW packages en gekoppelde modellen binnen het NHI. (Tussen haakjes staat de naam van het kennisinstituut vermeld als de software is aangepast of nieuw is ontwikkeld. Dit figuur is grotendeels ontleend aan de MIPWA rapportage.

**Oppervlaktewaterlopen (RIV package)** Er wordt een onderscheid gemaakt tussen vier typen waterlopen: hoofd (H), primair (P), secundair (S) en tertiair (T). De hoofdwaterlopen zijn de Rijkswateren en grote boezems, zoals deze in het Distributie Model (DM) gekozen zijn. De indeling primair/secundair/tertiair is gemaakt op basis van de breedte van de waterloop in de TOP10vector kaart van Rijkswaterstaat voor peilbeheerst Nederland, en op basis van afvoercriteria voor vrij afwaterend Nederland (Tabel 1). Voor meer informatie zie het NHI deelrapport 'Kenmerken Regionaal Oppervlaktewater'.

**tabel 1:** Indeling van waterlopen in drie klassen, met uitzondering van de hoofdwaterlopen H.

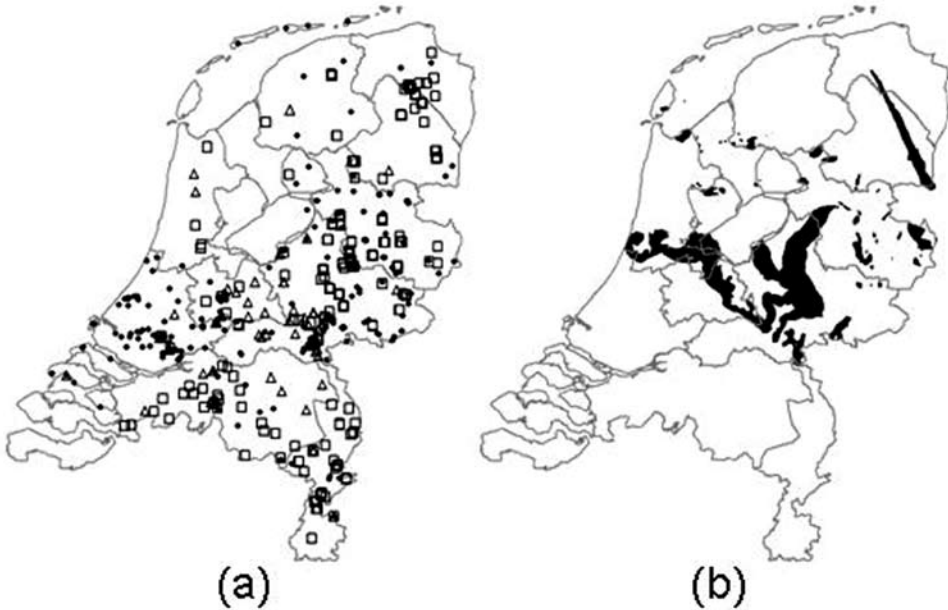
	<b>Laag Nederland (TOPI0vector breedte)</b>	<b>Hoog Nederland (Afvoercriterium)</b>
Primair	> 3m	> 100 liter/sec
Secundair	< 3m; uitgezonderd Tertiair	25-100 liter/sec
Tertiair	Greppels, droogvallende sloten	< 25 liter/sec

In de RIV package worden zowel de zomer- en winterpeilen van de waterlopen, de freatische lekweerstanden tussen de waterloop en de onderliggende modellaag, als de diepten van de waterbodem ingevoerd. Voor de peilen en bodemdieptes is de MOZART/DM parameterisatie als basis genomen. Dit is aangevuld met de aanwezige data binnen de kennisinstituten. Om de freatische lekweerstanden te bepalen is de formule van ‘De Lange’ toegepast. Zie hiervoor het artikel ‘Bepaling van de freatische lekweerstanden voor het NHI’ elders in deze uitgave van Stromingen.

**Buisdrainage (DRN package)** Hiermee wordt voornamelijk buisdrainage op landbouwpercelen gemodelleerd. De model invoer bestaat uit drainageweerstanden en drainagediepten. Op basis van studies voor regionale modellen (Noord Nederland; Snepvangers en Berendrecht, 2007; Limburg; Vermeulen et al, 2007; en Rivierenland en Rijn en IJssel; Linden, van der et al., 2008) is de landelijke parameterisatie voor de buisdrainage uitgevoerd. Hierna zijn de bestanden opgeschaald van 25 naar 250 m. Meer achtergrondinformatie is terug te vinden in het NHI deelrapport ‘Buisdrainage’.

**Maaiveld drainage (SOF package)** Met deze package wordt op een eenvoudig wijze drainage aan het maaiveld gesimuleerd wanneer de gemodelleerde grondwaterstand boven het maaiveld uitstijgt. Ten opzichte van het maaiveld wordt een drainageniveau en een kleine drainageweerstand opgegeven. De werking van deze package is hetzelfde als die van de DRN package. De gebruikte hoogte van het maaiveld binnen het NHI is verkregen door het AHN 5x5m landsdekkend te ‘filteren’ en het resultaat vervolgens op te schalen naar 25m en 250m. Meer achtergrondinformatie is terug te vinden in het NHI deelrapport ‘Maaiveld’.

**Onttrekkingen en infiltraties (WEL package)** Als basisbestand is het RIZA bestand met grondwateronttrekkingen genomen dat gebaseerd is op het Provinciaal Grondwaterregister. Voor een flink aantal drinkwaterwinningen is gedetailleerde, regionale, informatie uit andere studies gebruikt om het bestand voor het NHI te verbeteren. De lokale aanpassingen hebben betrekking op pompstations van: Waterbedrijf Groningen, Waterleiding Maatschappij Drenthe, Vitens (Friesland, Overijssel, Gelderland), Waterleiding Maatschappij Limburg en Brabant Water. Voor de modellering zijn onttrekkingen voor het jaar 2000 gekozen. Debieten van minder van 50.000 m<sup>3</sup>/jaar zijn niet meegenomen. Op basis van de filterdiepten en het lagenmodel voor de ondergrond (zie Hoofdstuk 3) zijn de onttrekkingen toegekend aan de MODFLOW modellen. Een overzicht van de onttrekkingen staat in Figuur 4 (links). Meer achtergrondinformatie is terug te vinden in het NHI deelrapport ‘Onttrekkingen’.



**figuur 4:** (a): Grondwateronttrekkingen □ : modellaag 2, Δ : modellaag 3; o : modellaag 4.  
 (b): locaties anisotropie. Aan modellaag 1 zijn geen onttrekkingen toegekend.

**Horizontale anisotropie (ANI package)** Deze package modelleert de horizontale anisotropie in gebieden waar de hydraulische geleidbaarheid van de ondergrond voor verzadigde grondwaterstroming in verschillende richtingen niet even groot is. De invoer bestaat uit de richting en de sterkte van anisotropie, respectievelijk de anisotropiehoek en anisotropiefactor genoemd. De promotieonderzoeken van Gehrels (1999) en Bakker (2004) zijn gebruikt voor het schatten van de anisotropie van gestuwde afzettingen. De invoer wordt binnen MODFLOW gebruikt volgens een methode die is beschreven in Vermeulen (2006). Anisotropie is toegepast voor modellagen 2 t/m 4. Figuur 4 (rechts) laat de gebieden zien waar anisotropie is gemodelleerd, zoals de Veluwe, de stuwwal van Nijmegen en het Montferland. Meer achtergrondinformatie is terug te vinden in het NHI deeloprapport 'Ondergrond'.

**Breuken (HFB package)** Breuken zijn op dit moment zeer beperkt meegenomen in het NHI model, omdat hierover weinig kwantitatieve informatie beschikbaar is. De Peelrandbreuk is de enige breuk die als water ondoorlatend is gemodelleerd. Het effect van de overige breuken op de grondwaterstroming wordt impliciet in het model meegenomen in de vorm van een sprong in doorlatendheden over de breukranden.

In het volgende hoofdstuk wordt het maken van ondergrond invoer voor MODFLOW (BCF package) uitgebreid beschreven.

## 3 Schematisatie en parameterisatie van de ondergrond

### 3.1 Van brongegevens ondergrond naar MODFLOW invoer

De drie slecht doorlatende lagen, zie Figuur 2, krijgen een verticale weerstand toegekend (c-waarde in dagen). De vier watervoerende pakketten krijgen een horizontale transmissiviteit toegekend (kD-waarde in m<sup>2</sup>/dag met D de dikte).

REGIS II.0 is een digitale regionale hydrogeologische kartering van de ondergrond van een groot deel van Nederland<sup>3</sup> (Vernes en Van Doorn, 2005). REGIS II.0 is een belangrijke bron voor het bepalen van de parameterwaarden van de modellen. Binnen REGIS II.0 worden 106 hydrogeologische eenheden onderscheiden. Deze eenheden bestaan uit zand, klei, veen of hebben een complexe samenstelling van zand, klei en veen. De weerstandbiedende hydrogeologische eenheden uit REGIS (klei, veen en sommige complexe lagen) vormen de kapstok van de ondergrondindeling voor NHI, omdat deze de ligging van de slecht doorlatende modellen bepalen. Echter omdat REGIS II.0 niet landsdekkend is en de opbouw van het Holoceen binnen REGIS II.0 niet is gedifferentieerd, is REGIS II.0 uitgebreid en aangepast voor toepassing in het NHI. Deze uitbreidingen en aanpassingen betreffen:

inpassen lagenmodel en parameters Noord-Groningen op basis van een grondwatermodel voor Noord Nederland (Snepvangers en Berendrecht, 2007);

- inpassen lagenmodel en parameters Limburg op basis van een vroegere levering van REGIS II.1 (Vernes, in voorbereiding);
- inpassen van STONE (Samen Te Ontwikkelen Nutriënten Emissiemodel), de landsdekkende parameterisatie van het topsysteem (Massop et.al., in voorbereiding);
- inpassen holocene detailkartering REGIS Zeeland (Vernes en Menkovic, in voorbereiding);
- inpassen van de parameterisatie van de holocene deklaag (Maljers en Vernes, in voorbereiding);
- onderscheid maken voor gestuwde afzettingen tussen kleiige gestuwde afzettingen (Oost-Twente) en zandige gestuwde afzettingen (de rest van Nederland).

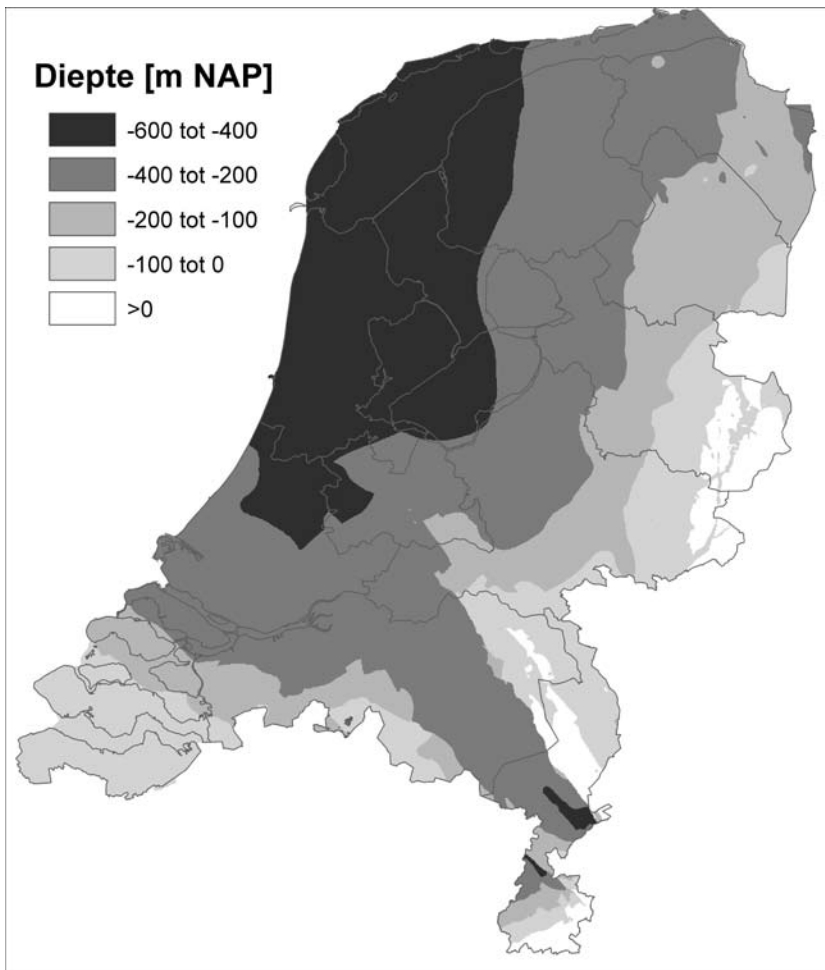
De werkwijze om MODFLOW invoerbestanden te creëren uit de hierboven opgesomde informatie is zoveel mogelijk geautomatiseerd door middel van een aantal gedocumenteerde GIS en FORTRAN programma's. Door deze werkwijze zijn gegenereerde invoerbestanden reproduceerbaar. Dit heeft twee belangrijke voordelen: a) aanpassingen kunnen relatief snel worden doorgevoerd, b) de herkomst van de informatie is eenvoudig achterhaalbaar. Hieronder wordt een aantal hoofdlijnen van de gevolgde werkwijze voor het genereren van de ondergrond modelinvoer gepresenteerd. Een gedetailleerde beschrijving van de werkwijze staat in het NHI deelrapport 'ondergrond'. Het maken van het ondergrondmodel bestaat uit twee hoofdonderdelen: het maken van het lagenmodel (boven- en onderkanten) en de parameterisatie (c en kD).

---

3 Het Fries-Groningse Waddengebied, het noordelijke deel van het vaste land van Noord-Groningen en Limburg vallen buiten het karteergebied van REGIS II.0, REGIS II.1 dat in oktober 2008 is opgeleverd is wel landsdekkend.

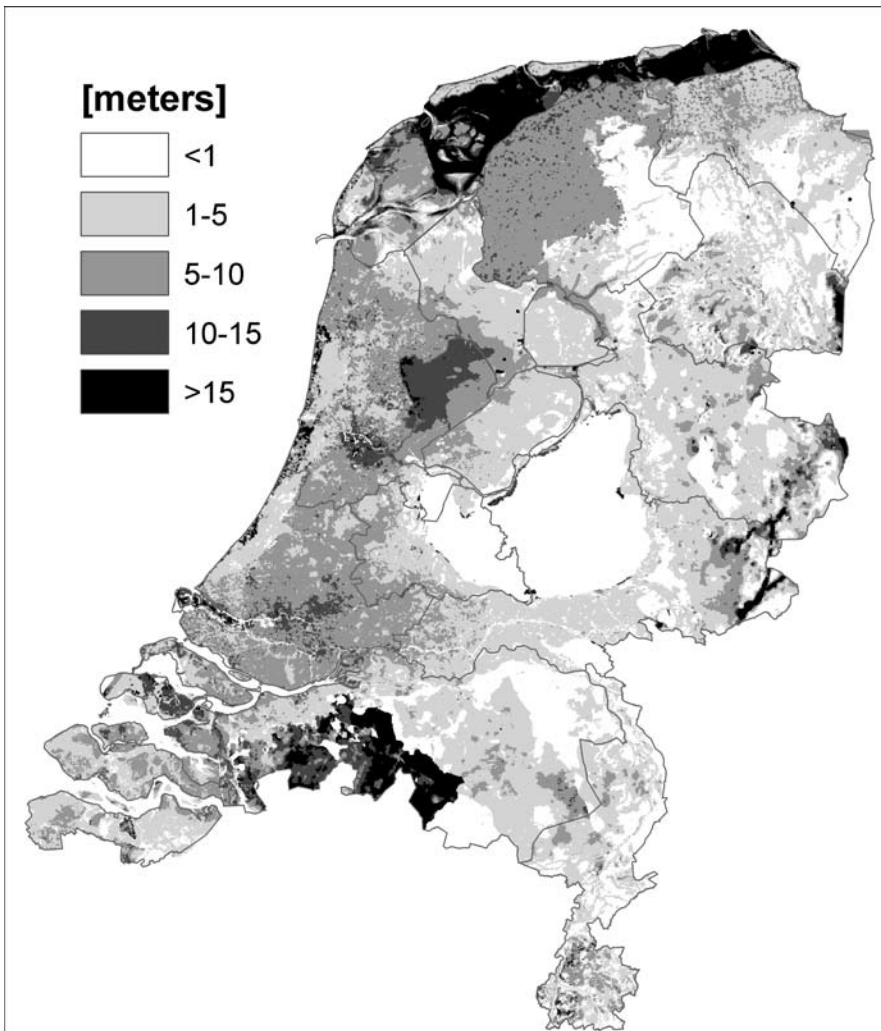
### 3.2 Lagenmodel

De hydrogeologische basis is een gekozen ondergrens van het grondwatersysteem. Deze ondergrens bestaat voor het Nederlandse systeem meestal uit zeer slecht doorlatende kleien. In het NHI model wordt verondersteld dat door de basis geen water stroomt en dat deze basis daarmee het grondwatersysteem hard afsluit. Binnen NHI Fase 1+ is er voor gekozen om de basis vrij diep te leggen (maximaal -580 m NAP). Vooral in West Nederland, zoals te zien is op de kaart in Figuur 5 ligt de basis dieper dan in regionale of lokale detailstudies gebruikelijk is. Deze keuze is gemaakt omdat ondiepere slecht doorlatende kleien, welke in regionale modellen wel gebruikt worden als hydrogeologische basis, vanuit een landelijk oogpunt niet een doorlopende basis vormen. Op willekeurige locaties zouden er dan sprongen in de basis komen. De basis bestaat vooral uit de bovenkanten van de mariene afzettingen van Breda, het Tertiair (Twente), en de kleien van Rupel ('Boomse' klei) en Tongeren (Zeeuws Vlaanderen).



figuur 5: Diepte hydrogeologische basis (meters NAP).



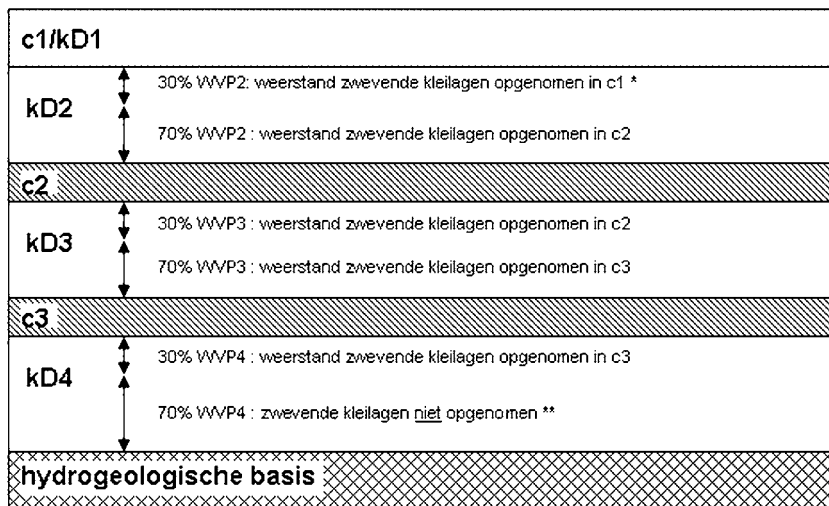


**figuur 6:** Dikte deklaag (meters).

Ruwweg kan de onderkant van de deklaag worden gedefinieerd als de onderkant van de eerste significante kleilaag in de ondiepe (ongeveer de eerste 30 m) ondergrond. Als er geen significante kleilaag aanwezig is binnen dit dieptebereik, zoals op de Veluwe, dan krijgt de deklaag een dikte van 0 m. In holocene gebieden kent het gebruik van REGIS beperkingen voor het vaststellen van de onderkant van de deklaag. Met uitzondering van de Provincie Zeeland wordt in REGIS namelijk geen nader onderscheid gemaakt tussen zand-, klei- en veenlagen binnen het Holocene. De onderkant van het Holocene is daardoor geen lithologisch, maar een geologisch (tijd) grensvlak. Dit geologische grensvlak valt daardoor lang niet overal samen met de onderkant van een slecht doorlatende laag, zodat niet overal de onderkant van de deklaag correct kan worden vastgesteld. Voornamelijk op plekken waar diepe holocene geulen voorkomen, zoals in het westelijk deel van Noord-Holland, is de onderkant van het Holocene zandig. Dit

zand hoort hydrologisch bij het eerste watervoerende pakket en niet bij de deklaag. In Zeeland is daarom gebruik gemaakt van de detailkartering voor het Holoceen (Vernes en Menkovic, in voorbereiding). In de rest van de holocene gebieden waarvoor STONE een deklaag heeft gekarteerd (Massop et al., in voorbereiding) is de onderkant van deze deklaag overgenomen, en dus niet die uit REGIS. De STONE kartering is gebaseerd op boringen uit DINO (<http://dinoloket.nitg.tno.nl>). Binnen STONE is veel aandacht besteed aan het correct vaststellen van de onderkant van de deklaag als zijnde de onderkant van de ondiepste significante klei- of veenlaag. In STONE is dus wel rekening gehouden met zandbanen in de onderkant van het Holoceen. De dikte van de deklaag staat in Figuur 6.

Onder de deklaag zijn in REGIS ruim 50 kleilagen aanwezig, die in het NHI grotendeels zijn ingedeeld in twee slecht doorlatende lagen (SDL2 en SDL3). Dit is dus een grove schematisatie (Figuur 7). Op basis van een groot aantal landelijke en lokale profielen zijn kleilagen toegekend aan slecht doorlatende modellagen. In bijlage 2 van het NHI 'Ondergrond' deelrapport is de gebruikte indeling per REGIS kleilaag terug te vinden. In gebieden waar relatief veel REGIS kleilagen voorkomen is een beperkt deel van de kleilagen niet ingedeeld in een slecht doorlatende laag. Deze kleilagen, binnen NHI 'zwevende' kleilagen genoemd, vallen daardoor binnen een watervoerend pakket. Bij de toekenning van de weerstanden wordt (zie hieronder) hier apart rekening mee gehouden. De meeste complexe REGIS lagen, die bestaan uit een niet nader gekarteerde afwisseling van zand en klei, zijn qua diepteligging ingedeeld bij de watervoerend pakketten. Op locaties waar geen REGIS kleilaag in een slecht doorlatende modellaag zit is, door middel van extrapolatie, een zogenaamd hypothetisch grensvlak gemaakt. Op deze locaties zijn de boven- en onderkanten van de slecht doorlatende modellaag gelijk aan elkaar, waardoor de slecht doorlatende laag geen dikte heeft. Dit hypothetische grensvlak dient dan als modelmatige scheiding tussen de watervoerende pakketten.



\*: voor NAGROM/STONE en Zeeland deklaag is verondersteld dat de zwevende kleilagen al in de deklaag zitten

\*\* : vallen weg in geohydrologische basis

figuur 7: Profiel schematisatie van klei- en zandlagen in het NHI lagenmodel.

### 3.3 Parameterisatie

De kD- en c-waarden worden als volgt afgeleid:

$$\begin{aligned} \text{Watervoerende Pakketten:} & \quad kD = k_{h(\text{horizontaal})} * \text{Dikte} \\ \text{Slecht Doorlatende Lagen:} & \quad c = \text{Dikte} / k_{v(\text{vertikaal})} \end{aligned}$$

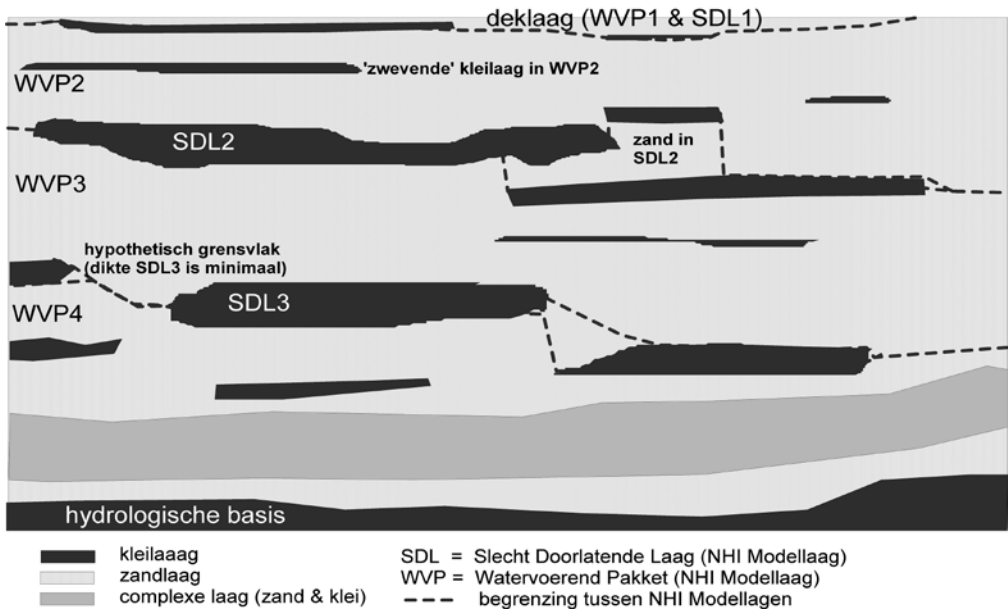
De dikten van de modellagen komen uit het lagenmodel. Een uitzondering hierop vormt de dikte van watervoerende lagen die niet volledig verzadigd zijn, bijvoorbeeld onder de Veluwe. Voor deze lagen is de waterverzadigde dikte bepaald als het verschil tussen de hoogst mogelijke grondwaterstand en de onderkant van de modellaag. De doorlatendheden in horizontale en verticale richting (respectievelijk  $k_h$  en  $k_v$  in m/dag) zijn vastgesteld op basis van REGIS. REGIS heeft voor iedere hydrogeologische eenheid een digitale  $k_h$  - kaart (voor zand en complexe eenheden) en/of een  $k_v$  - kaart (voor klei, veen en complexe eenheden). Voor het grootste deel van het Holoceen zijn de parameters van het STONE model gebruikt. Op basis van deze k-waarden en de dikte van een hydrogeologische eenheid binnen de betreffende modellaag wordt een gewogen  $k_h$  of  $k_v$  bepaald voor deze modellaag.

Bijvoorbeeld, als een watervoerende modellaag voor 25% is opgebouwd uit zanden van de eenheid Boxtel en voor 75% uit zanden van de eenheid Eem, dan wordt de gewogen gemiddelde k-waarde:

$$K_h = 0,25 * k_h \text{ Boxtel zand} + 0,75 * k_h \text{ Eem zand}$$

Hoewel de hierboven (Figuur 7) geïntroduceerde ‘zwevende’ kleilagen betreffende hun diepteligging niet binnen een slecht doorlatende modellaag liggen, kunnen deze kleilagen wel degelijk weerstand bieden aan grondwaterstroming. In Figuur 8 is aangegeven op welke manier de weerstanden van REGIS kleilagen doortellen in de weerstand van nabijgelegen slecht doorlatende lagen. De weerstand van de zogenaamde ‘zwevende’ kleilagen wordt, afhankelijk van hun diepte, opgeteld bij de weerstand van de slecht doorlatende modellaag die boven of onder de kleilaag ligt. Er is gekozen voor een 30-70% verdeling om de weerstanden beter te laten aansluiten bij filterstellingen. Wanneer meetfilters of onttrekkingsfilters worden geplaatst, dan wordt dit vaak net onder een scheidende laag, relatief hoog in een watervoerend pakket, gedaan. Wanneer de misschien meer voor de hand liggende verdeling van 50-50% wordt gebruikt, komt relatief te veel weerstand modelmatig boven de filter. In het NHI ondergrondrapport staat beschreven hoe de complexe REGIS lagen (een niet nader gekarteerde afwisseling van klei, zand en veen) zijn behandeld bij de parameterisatie.

In een zone van 5 km rond het modelleergebied zijn de parameterwaarden (c en kD) geëxtrapoleerd op basis van de parameterwaarde in de dichtst bij gelegen modelcel binnen het modelleergebied. In de rest van het buitenland is een vaste waarde genomen. Hier zijn echter twee uitzonderingen op: De Roerdalslenk en Het Kempens Plateau in België.



**figuur 8:** Overzicht van gebruikte NHI laaggrenzen voor het indelen van weerstanden van 'zwevende' kleilagen in Slecht Doorlatende lagen.

### 3.4 Resultaat parameterisatie

De parameterwaarden ( $c$  en  $kD$ ) van de vier modellagen zijn gepresenteerd in Figuur 9 en Figuur 10. Een aantal markante fenomenen die gerelateerd zijn aan de geologie zijn duidelijk zichtbaar in de figuren:

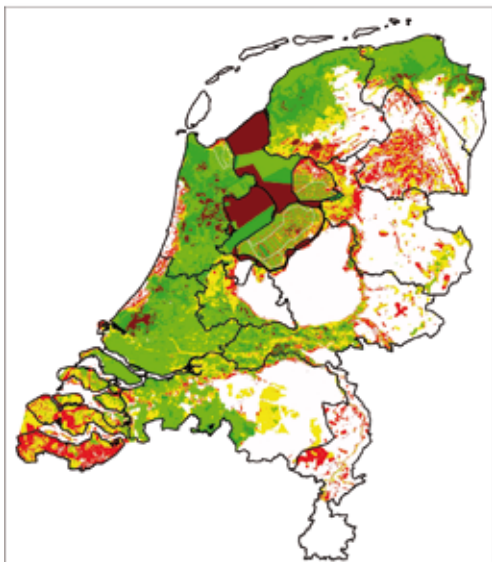
- de deklaag heeft vooral een hoge weerstand in gebieden waar holocene afzettingen aanwezig zijn (kustgebied, rivierengebied), Drenthe (keileem) en zuidwest Brabant waar een relatief diepe kleilaag (Waalre klei) de onderkant van de deklaag vormt;
- de keileem in Noord Nederland duikt weg naar het westen (Friesland), om deze reden zit de keileem in Friesland in laag 2 ( $c_2$ ) en in Drenthe in laag 1 ( $c_1$ );
- de hoge weerstanden in Noord Nederland ( $c_3$ ) vinden vooral hun oorsprong in de potklei (Peelo klei);
- de diepe centrale slenk in Limburg wordt gekenmerkt door hoge  $c$  ( $c_2$  en  $c_3$ ) en  $kD$  waarden ( $kD_2$  en  $kD_3$ ) en een scherpe overgang op de locaties van de breuken (Noord-Limburg en Noordoost-Brabant).

Regio's en dieptes waar de  $kD$  en  $c$ -waarden verbeterd kunnen worden, zijn:

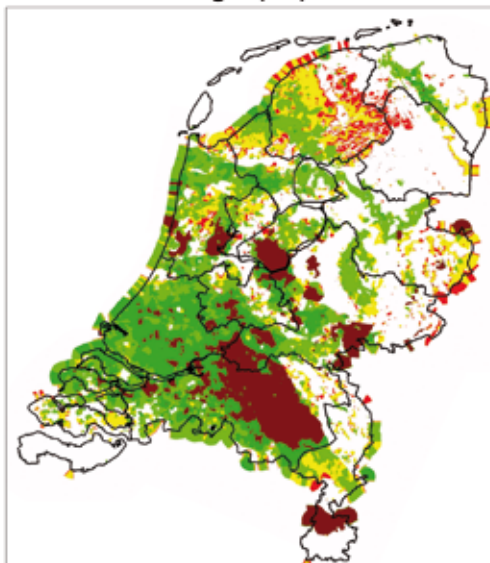
- De diepere lagen ( $kD_3$ ,  $c_3$  en  $kD_4$ ) in het grensgebied tussen Zuid-Holland en Noord-Brabant wegens het doorwerken van de REGIS karteergrenzen.
- De Roerdalslenk kent relatief veel klei- en zandlagen. Belangrijke watervoerende pakketten kunnen hier, wegens het beperkte aantal NHI modellagen, niet van elkaar onderscheiden worden.
- De hoge  $kD_4$  in en rondom het IJsselmeergebied door het samenvoegen van hydrologisch gescheiden zandpakketten. De zandpakketten zijn samengevoegd wegens het beperkte aantal NHI modellagen in combinatie met de diepe hydrogeologische basis.

- De opbolling van de grondwaterstand onder de Veluwe wordt niet optimaal gemodelleerd vanwege het niet meenemen van de weerstand van de complexe lagen in de parameterisatie. Dit is gerelateerd aan het beperkte aantal NHI modellen.
- De grensgebieden, omdat er geen hydrogeologische informatie uit het buitenland is gebruikt en er dus (nog) niet een op hydrogeologische kennis gebaseerde MODFLOW modellering heeft plaats gevonden.

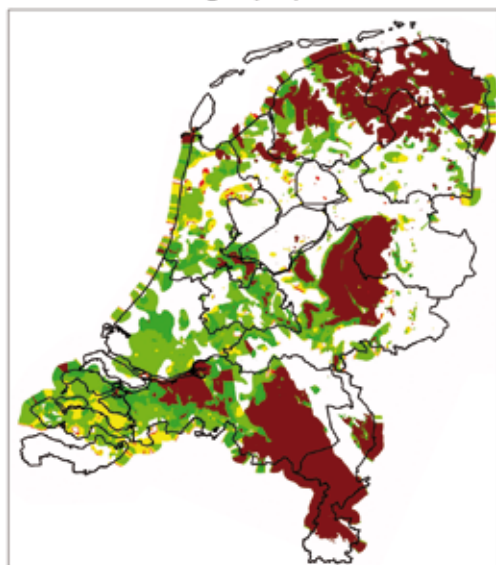
**Weerstand laag 1 (C1, deklaag)**



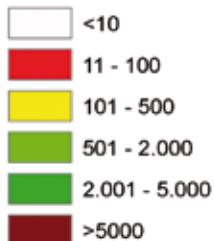
**Weerstand laag 2 (C2)**



**Weerstand laag 3 (C3)**

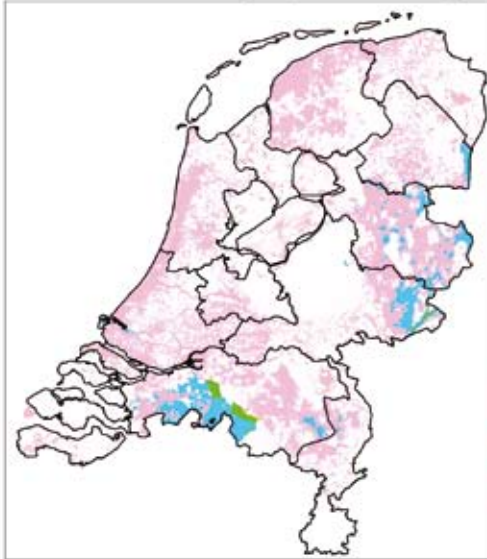


**[dagen]**

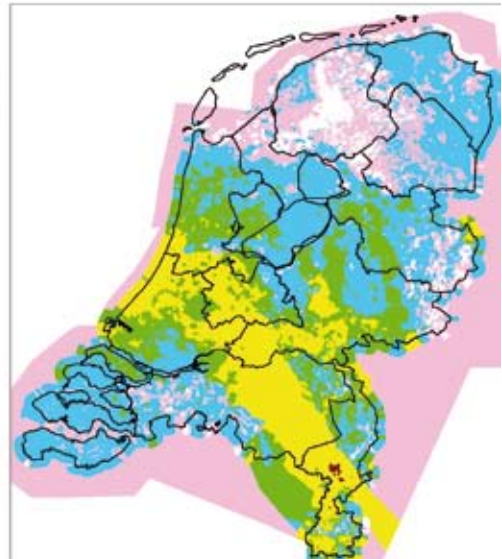


**figuur 9:** Weerstand van de ondergrond van het NHI lagenmodel.

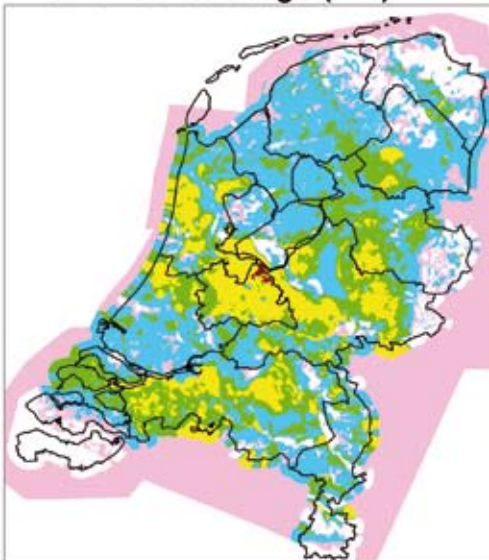
Transmissiviteit laag 1 (kD1, deklaag)



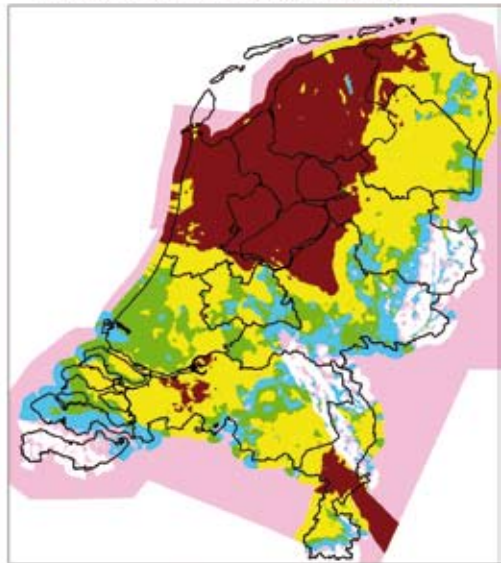
Transmissiviteit laag 2 (kD2)



Transmissiviteit laag 3 (kD3)



Transmissiviteit laag 4 (kD4)



figuur 10: Transmissiviteiten van de ondergrond van het NHI lagenmodel.

## 4 Conclusies en vooruitblik

### 4.1 Conclusies

Wat is de huidige status van het NHI grondwatermodel? In dit artikel is beschreven dat er veel en de best beschikbare data zijn gebruikt om het model vanaf de basis op te bouwen. Hierbij heeft de nadruk gelegen op consensus, consistentie, reproduceerbaarheid en documentatie van het model. Het resultaat is dat er een basismodel ligt, waarover overeenstemming bestaat tussen de participerende partijen binnen het NHI over de gevolgde werkwijzen en gebruikte basisbestanden. Dit basismodel vormt een startpunt voor het doorrekenen van landelijke scenario's en voor verdere ontwikkeling.

### 4.2 Concrete aanbevelingen voor korte termijn

De volgende concrete aanbevelingen worden gedaan om het NHI model uit te breiden en te verbeteren:

- De ondergrond dient op de nieuwe REGIS (II.1) te worden gebaseerd. Dit wordt aanbevolen omdat er ten op zichte van REGIS II.0 een aantal belangrijke verbeteringen zijn doorgevoerd, bijvoorbeeld de te lage parameterwaarden van diepere zandlagen en kartering van Noord-Groningen en Limburg.
- Het huidige NHI model kent beperkingen in de representatie van de diepere lagen in de ondergrond. Vergroting van het aantal modellagen lijkt hiervoor de logische oplossingsrichting. Hierbij moet echter wel rekening worden gehouden met de beschikbare reken capaciteit.
- De modellering van breuken verdient duidelijk verbetering. Op basis van grondwatermetingen (isohypsenkaarten) zou de mate van water doorlatendheid geschat kunnen worden en vertaald kunnen worden naar relevante modelparameters.
- Het is aan te bevelen het gebruikte basisbestand van grondwateronttrekkingen te verbeteren. Onvolkomenheden, zoals verkeerde putlocaties en filterdiepten, dienen gecorrigeerd te worden. Het bestand zou moeten worden aangevuld met meer regionale kennis, zoals industriële grondwateronttrekkingen die niet zijn meegenomen. Tevens is het aan te bevelen tijdsafhankelijke grondwateronttrekkingen in de modellering mee te nemen.
- Voor het buitenland is een grove schatting gemaakt van de parameters van de ondergrond. Het is aan te bevelen om de MODFLOW schematisatie van de ondergrond voor de grensgebieden (België, Duitsland en Noordzee) ook te baseren op hydrogeologische informatie. Hierbij moet zoveel mogelijk gebruik worden gemaakt van kennis uit buitenlandse en grensoverschrijdende grondwatermodellen.
- De deklaagkartering en parameterisering kunnen consistentier door deze landsdekkend uit te voeren op basis van een reproduceerbare analyse van de DINO boringen.
- Het inpassen van chloride effecten (zoet-zout) op het grond- en oppervlaktewater.

### 4.3 Discussie

Hoe goed is het NHI grondwatermodel nu eigenlijk? Het moet duidelijk zijn dat het model nog niet automatisch gekalibreerd is en de resultaten nog niet uitvoerig vergeleken zijn met metingen. Echter, ondanks deze beperkingen is het model kwalitatief en kwantitatief 'plausibel' bevonden door de NHI projectgroep. Plausibel houdt in dit geval

in dat de experts van de projectgroep hebben geconcludeerd dat de in- en uitvoer van het model: a) landelijk de verwachte hydrologische patronen laten zien (kwalitatief), en b) qua ordegrootte aansluiten bij de verwachting (kwantitatief).

Is het NHI grondwatermodel klaar? Nee, maar er is wel een werkbaar basismodel! Dit model zal zich de komende periode moeten gaan bewijzen voor landsdekkende toepassingen, zoals de droogtestudie. Met de resultaten van deze toepassingen en de hierboven beschreven korte termijn acties zal het model worden verbeterd. Hiervoor is een aantal iteratie slagen nodig voordat er gekalibreerd en gevalideerd wordt. Het uitwisselen van kennis tussen regionale modellen en het NHI zal hierin een prominente rol spelen. De concrete invulling van bovenstaande activiteiten moet nog nader worden uitgewerkt. Dit zal nog genoeg stof voor discussie geven!

## Referenties

- Bakker, M.A.J. (2004)** *The internal structure of Pleistocene push moraines: A multidisciplinary approach with emphasis on ground-penetrating radar. Ph.D. thesis, Queen Mary, University of London, TNO Built Environment and Geosciences, Geological Survey of the Netherlands.*
- Gehrels, J.C. (1999)** *Groundwater level fluctuations: Separation of natural from anthropogenic influences and determination of groundwater recharge in the Veluwe area, the Netherlands. PhD thesis Vrije Universiteit.*
- Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill en M.G. McDonald (2000)** *MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process; U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92.*
- Linden, W. van der, e.a., (2008)** *AMIGO Actueel Model Instrument Gelderland Oost. Deltares/TNO rapport, 2008-U-R0749/A*
- Linden, W. van der, e.a., (2008)** *Grondwatermodellering Rivierenland. Deltares/TNO rapport, 2008-U-R0827/A.*
- Maljers, D. en R.W. Vernes (in voorbereiding).** *Weerstand van de holocene deklaag. Deltares.*
- Massop, H.Th.L., I. Peereboom, W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors, P.J.T. van Bakel en J. Hoogewoud (in voorbereiding),** *Relatie grondwater- oppervlaktewater – Landsdekkende parametrisatie van het topsysteem. Alterra rapport 1398. Alterra, Wageningen, 58 pagina's + bijlagen.*
- Snepvangers, J. en W. Berendrecht (2007)** *MIPWA, Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer. Utrecht, TNO-rapport 2007-U-R0972/A.*
- Vermeulen, P., W. van der Linden, A. Veldhuizen, H. Massop, H. Vermulst en W. Swierstra (2007)** *IBRAHYM, Grondwater Modelinstrumentarium Limburg. Utrecht, TNO-rapport 2007-U-R0193/B.*
- Vermeulen, P. (2006)** *Model-Reduced Inverse Modeling. Proefschrift, TU Delft.*
- Vernes, R.W. (in voorbereiding).** *REGIS Limburg, Uitbreiding van de dataset REGIS II voor de provincie Limburg. Utrecht, Deltares/TNO Geological Survey of the Netherlands.*



**Vernes, R.W. en Th.H.M. van Doorn (2005)** *Van Gidslaag naar Hydrogeologische Eenheid Toelichting op de totstandkoming van de dataset REGIS II. TNO rapport NITG 05-038-B. TNO, Utrecht, 69 pagina's + bijlagen.*

**Vernes, R.W. en A. Menkovic (in voorbereiding)** *REGIS Zeeland, Deelrapport B: Hydrogeologische opbouw en hydraulische eigenschappen van Holocene afzettingen. Utrecht, Deltares/TNO Geological Survey of the Netherlands.*