

Leidraad grondwatermodellering (sectie)

Onderstaand wordt een deel van het INBO-rapport “Leidraad grondwatermodellering voor passende beoordeling” van Van Daele & De Bie (2015) weergegeven als bijlage bij deze praktische wegwijzer.

1. Leidraad grondwatermodellering voor passende beoordeling en ecohydrologische studies

1.1 Inleiding

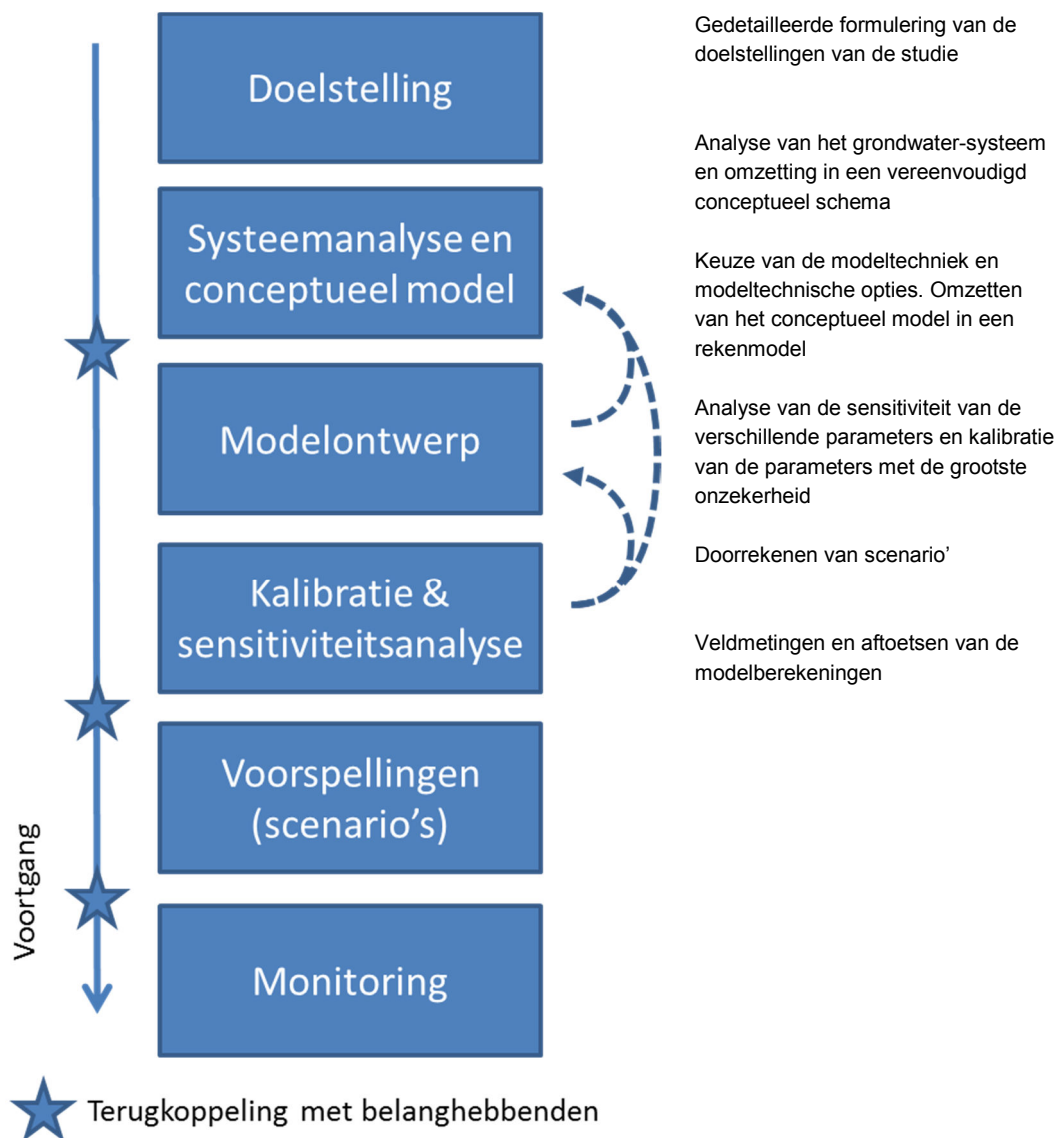
Deze leidraad heeft als doel de alle belanghebbenden te ondersteunen bij de opmaak van een passende beoordeling voor een grondwaterwinning (effectgroep verdroging/vernatting). Voor een ervaren modelleerder biedt de tekst inhoudelijk allicht weinig nieuws, maar kan het een kader bieden voor het doorlopen van het modelleerproces en het structureren van de rapportage. Er wordt op aangestuurd om alle opties en keuzes gestructureerd en expliciet te formuleren en te motiveren, ook wanneer die voor een ervaren hydroloog voor de hand liggend zijn. Voor niet-specialisten geeft deze leidraad allicht een houvast om de verschillende elementen en de kenmerken van een modelleringstudie te situeren.

De leidraad heeft ook als doel de belanghebbenden, die vaak een heel verschillende achtergrond en invalshoek hebben, een gezamenlijk kader voor structuur en terminologie te bieden en zo het onderling begrip en de onderlinge communicatie te bevorderen. De meeste technische begrippen worden verklaard in een begrippenlijst in de bijlage.

De leidraad is uitgewerkt voor ‘grondwatermodellering van een grondwaterwinning in functie van de kwantitatieve impact’. De tekst is vrij generiek uitgewerkt. Er wordt niet voor specifieke modeltechnieken of softwarepakketten gekozen. De tekst is niet exhaustief, mogelijk ontbreken er aanbevelingen voor heel specifieke of uitzonderlijke situaties (vb. bij hoge saliniteit). De relevantie en de toepassing van de verschillende onderdelen van de leidraad moet geval per geval worden overwogen. Het is zeker geen handboek grondwatermodellering. Elk grondwatermodel, hoe eenvoudig ook, vereist de nodige expertkennis en ervaring. Dit geldt ook voor de belanghebbenden die de resultaten van de studie moeten beoordelen en interpreteren.

1.1.1 Het modelleerproces

Het modelleerproces delen we hier op in zes verschillende stappen (Figuur 1). Afhankelijk van de doelstellingen en de te verwachte betrouwbaarheid van het model kan aan elk van deze stappen meer of minder aandacht worden besteed. Het is aangewezen om elke stap expliciet te doorlopen en te motiveren indien een onderdeel weinig is uitgewerkt. Het modelleerproces wordt niet noodzakelijk lineair in een keer doorlopen. Het is een iteratief proces dat vaak terugkoppeling naar een voorgaande fase vereist.



Figuur 1: : Verschillende stappen van het modelleerproces

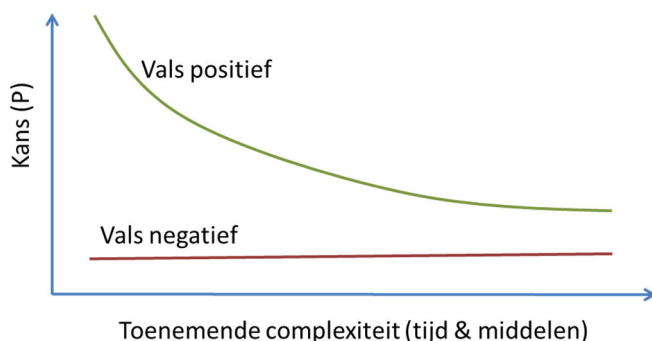
1.1.2 Van eenvoudig naar complex

Een modellering is een sterke vereenvoudiging en schematisering van de realiteit in het studiegebied. Er bestaat geen ultiem en meest geschikt grondwatermodel voor een bepaalde vraagstelling. Meestal zijn meerdere benaderingen valabel, elk met voor- en nadelen.

De uitkomsten van een grondwatermodel zijn nooit exact. De interpretatie van de resultaten moet dan ook rekening houden met de onzekerheden. Een meer gedetailleerd model is vaak nauwkeuriger, maar is ook veel complexer en vereist extra inzet van tijd en middelen. De keuzes over de detailgraad en complexiteit is een afweging waarbij de meest eenvoudige, maar toch bruikbare aanpak wordt gezocht.

Bij een impactstudie staat niet de kennis van het systeem voorop, maar wel de correcte inschatting van de maximaal te verwachten impact. De keuze van de detailgraad en complexiteit is een afweging tussen de kost voor het extra studiewerk en de vereiste betrouwbaarheid. Dit is mogelijk door initieel uit te gaan van een eenvoudige aanpak en enkel die informatie en complexiteit toe te voegen die vereist is voor de vraagstelling van de studie. Zo kan een aanvaardbaar niveau van betrouwbaarheid worden bereikt met de meest eenvoudige, maar geschikte methode.

Bij eenvoudige situaties kan het volstaan aan te tonen dat de maximale verlaging van de grondwaterstand niet groter zal zijn dan een vastgelegde waarde. Wanneer voor alle onzekerheden uitgegaan wordt van een 'worst case' aanname blijft het risico op een vals negatieve resultaat beperkt. De kans op een vals positief resultaat zal vrij hoog zijn. Extra metingen en modelcomplexiteit kunnen de kans op vals positieve resultaten verminderen (zonder een significante verhoging van de vals negatieven), maar dit vereist een aanzienlijke investering van zowel tijd als middelen (Figuur 2).



Figuur 2: Schematische voorstelling van de worst-case benadering bij toenemende complexiteit

1.1.3 Formuleren doelstelling

Van bij de start van het project moet er onder de belanghebbenden eensgezindheid en duidelijkheid zijn over de doelstellingen van de modellering en het voorziene gebruik van de modelresultaten (beschrijvend of voorspellend, de aard en omvang van de te modelleren ingreep en impact, de verschillende scenario's, ...).

Een grondwatermodel kan niet zondermeer voor heel uiteenlopende doeleinden worden ingezet. Een regionaal grondwatermodel is meestal niet geschikt om uitspraken te doen over zeer lokale situaties en omgekeerd. Een duidelijke omschrijving van de doelstelling en het voorziene gebruik van het model helpt om juiste keuzes te maken in de opeenvolgende fasen van het modelleerproces (opbouw conceptueel model, modelontwerp, kalibratie, predictie, onzekerheidsanalyse, ...).

De beschrijving van het voorziene gebruik betekent dat bij de start wordt nagedacht over de gewenste betrouwbaarheid van het model en welk type output gewenst is. In de loop van het modelleerproces kan echter blijken dat omwille van uiteenlopende redenen de vooropgestelde betrouwbaarheid niet haalbaar is (bv. onvoldoende inzicht in het systeem, te weinig betrouwbare referentiemetingen, ...).

Aandachtspunt: In deze fase van de studie wordt vastgelegd hoe de resultaten van het grondwatermodel worden afgetoetst aan de vereisten voor de vegetaties. Deze keuze heeft een belangrijke invloed op de vereiste aard van de output en nauwkeurigheid die van de modelresultaten wordt verwacht.

De doelstelling omvat een beschrijving van de verschillende scenario's of situaties die zullen worden doorgerekend. Deze scenario's kunnen, analoog aan het MER richtlijnenboek, worden ingedeeld in 'referentiescenario', 'geplande situatie' en 'milderende maatregelen':

- **Referentiescenario:** Een analyse van de huidige toestand van het watersysteem (analyse van de referentiesituatie);
- **Geplande situatie:** Een evaluatie van de mogelijke effecten van het project, plan of programma op het watersysteem (analyse van de geplande situatie);
- **Milderende maatregelen:** Het voorstellen van maatregelen om eventuele schadelijke effecten op het watersysteem te voorkomen of te beperken tot een aanvaardbaar niveau in relatie met de vooropgestelde doelstellingen voor het watersysteem (milderende maatregelen).

Hoe groter de invloed van een ingreep op het grondwatersysteem, hoe groter de kwaliteitseisen zijn om het model als voorspellend instrument in te zetten. Een grondwatermodel dat de referentiesituatie goed beschrijft zal hoogst waarschijnlijk een ingreep met beperkte invloed vrij betrouwbaar kunnen voorspellen. De belangrijkste hydrologische processen zijn dezelfde en de grootte van de transfers

blijft binnen dezelfde range. Bij scenario's met ingrepen die een grote invloed hebben op het grondwatersysteem (vb. bepaalde hydrologische processen keren om of nieuwe hydrologische processen die belangrijk worden) is de kans groot dat het model van het referentiesituatie geen betrouwbare resultaten kan leveren. De robuustheid van het model is in dit geval erg belangrijk. Dit kan worden ondervangen door voor alle onzekerheden en onbekenden in het model een 'veilige keuze' te maken en een 'worst case' scenario toe te passen.

Vb1. Een beperkte uitbreiding van een bestaande grondwaterwinning. Een grondwatermodel dat de referentiesituatie goed beschrijft is allicht goed inzetbaar om de situatie bij een uitbreiding te voorspellen. De belangrijkste hydrologische processen blijven hetzelfde.

Vb2. Langdurige bemaling voor een (diepe) ontginning. Deze ingreep heeft een grote impact op het grondwatersysteem. Een grondwatermodel dat de referentiesituatie goed weergeeft is niet noodzakelijk geschikt voor de voorspelling van de impact in de geplande situatie.

Aandachtspunt: bij ecohydrologische studies is de modellering van het topsysteem of de berekening van de grondwatertafel cruciaal. Relatief kleine verschillen in grondwaterdynamiek kunnen een grote impact hebben op de vegetaties. Het is erg moeilijk om met een grondwatermodel een dergelijke nauwkeurigheid te behalen. De relatieve veranderingen ten aanzien van een referentiesituatie zijn vaak minder onzeker en beter geschikt. Wanneer het topsysteem niet voldoende nauwkeurig is uitgewerkt kan ervoor worden geopteerd om voor alle assumpties steeds een 'veilige keuze' te maken om zo tot een model te komen dat een 'worst-case' situatie verkent.

1.1.4 Modeltechnische opties

Er is een breed gamma aan grondwatermodelleringstechnieken beschikbaar. Er is niet één techniek die het meest geschikt is voor alle toepassingen. Het belangrijkste is dat de modeltechniek aangepast is aan de doelstellingen en de hydrogeologische context. De modeltechniek wordt opgedeeld op basis van de dimensie van de modellering (1D, 2D, 3D) en de oplossingsmethode (analytisch of numeriek).

1.1.4.1 Dimensie (ruimtelijk)

De ruimtelijke dimensie varieert van 1D tot full 3D. Het beperken van de dimensie vereenvoudigt sterk het conceptueel model, de vereiste invoerdata, de rekentijd en de complexiteit en interpretatie van de modelresultaten.

- 1D modellering worden meestal gebruikt voor de berekening van de verticale stroming in de onverzadigde zone. Ze zijn niet geschikt voor de berekening van de horizontale stroming in de verzadigde zone.
- 2D modellering in een verticaal vlak is mogelijk langs de stroombaan, loodrecht op de isohypsen (vb. tussen twee kanalen of dwars op een vallei). Dit is enkele mogelijk in een uniform stromingsveld met min of meer parallelle stroming.
- 2D radiaal symmetrische modellen zijn zeer geschikt voor de modellering van de effecten van grondwaterwinningen in eenvoudige situaties. De assumptie is dat de hydrogeologische opbouw en de stroming hetzelfde is in alle richtingen rondom de put.
- Quasi 3D modellen gaan uit van uitsluitend horizontale stroming in aquifers die boven en onder worden begrensd door aquitards met uitsluitend verticale stroming. Quasi 3D modellen worden veel gebruikt. Ze zijn voldoende flexibel om het grondwatersysteem voldoende nauwkeurig te beschrijven voor de meerderheid van de vraagstellingen.
- 3D modellen beschrijven de grondwaterstroming in alle drie de dimensies. Het is de meest volledige aanpak, maar vereist extra rekenkracht en complexiteit.

1.1.4.2 Oplossingsmethode

De oplossingsmethode voor grondwaterberekeningen kunnen grofweg ingedeeld worden in analytische formules, analytische elementen en de numerieke methoden eindige elementen en eindige verschillen.

- Analytische formules: voor de berekening van de verlaging van de grondwaterstand in de omgeving van een winningsput bestaan een aantal analytische formules (Theim, Theis, ...).

Ze gelden voor een homogeen en heel eenvoudig hydrologisch systeem. Het aantal parameters blijft beperkt en de formules zijn eenvoudig uit te rekenen.

- Analytische elementen: de combinatie (superpositie) van analytische oplossingen laat toe om meer complexe situaties te berekenen (bijvoorbeeld de invloed van meerdere grondwaterwinningen of de infiltratie vanuit oppervlaktewater). De analytische elementmethode wordt snel erg complex waardoor meestal geopteerd wordt voor een eenvoudig schematisch numeriek model.
- Numeriek – eindige differenties (finite differences): de eindige elementenmethode deelt het studiegebied op in homogene cellen. In elke cel kunnen de variabelen een verschillende waarde aannemen. De eindige differentie methode is heel flexibel om complexe grondwatersystemen te modelleren. Op locaties waar meer detail nodig is kan de grootte van de cellen worden aangepast.
- Numeriek – eindige elementen (finite elements): bij de eindige elementmethode wordt het studiegebied ingedeeld in een netwerk van homogene elementen. De vorm en de grootte van die elementen is vrij te kiezen. De eindige elementen methode is zeer geschikt om lokaal het netwerk van de elementen te verdichten.

1.1.4.3 Software

Voor de lijst met softwarepakketten verwijzen we naar de bijlage 3 van het MER Richtlijnenboek – Water (Van de Broeck et al., 2011). Het is een uitgebreide lijst met de meest voorkomende softwarepakketten voor grondwatermodellering.

Een softwarepakket dat niet in de bijlage 3 werd opgenomen, maar dat in deze context zeker vermeld moet worden is het programma MLU (Multi-Layer Unsteady state). Het werd ontwikkeld door Kick Hemker (www.microfem.com/products/MLU). Het programma is relatief eenvoudig en zeer gebruiksvriendelijk uitgewerkt. De benadering is zeer geschikt voor de tijdsafhankelijke berekening van verlagingen in situaties met meerdere lagen en een of meerdere grondwaterwinningspunten. De belangrijkste beperkingen zijn de horizontaal uniforme hydrogeologie en de afwezigheid van een topsysteem.

Aandachtspunt: Empirische formules, zoals de formule van Sichardt, zijn weinig betrouwbaar en worden sterk afgeraden.

1.1.5 Keuze modelaankpak

Een goede keuze is een zo eenvoudig mogelijk, maar toch geschikte methode. Het is niet mogelijk om vaste regels voor de modelaankpak uit te werken. De variatie op het terrein en de mogelijke keuzes in modelaankpak zijn hiervoor te groot. Hieronder worden wel enkele voorbeelden uitgewerkt.

Bij een eenvoudige doelstelling (bijvoorbeeld: nagaan of een verlagend effect van een kleine winning kleiner op een afstand x kleiner is dan een bepaalde grenswaarde) kan een eenvoudige analytische formule allicht volstaan. Bij een complexe doelstelling (bijvoorbeeld aftoetsen van milderende maatregelen met ingrijpende wijzigingen in het hydrologische systeem) is vrijwel zeker een 3D numerieke en tijdsafhankelijke modellering vereist.

De geschikte modelaankpak hangt ook af van de complexiteit van het hydrogeologische systeem. Kleine grondwaterwinningen hebben impact op een beperkt gebied. De kans is dan vrij groot dat het conceptueel schema beperkt kan worden tot een eenvoudige hydrogeologische stratificatie met horizontaal uniforme gelaagdheid. In dit geval is aan de assumpties voor een eenvoudige analytische berekening voldaan.

Een grote grondwaterwinning beïnvloedt het hydrologische systeem in een groot gebied, vaak over meerdere grondwaterlagen heen en wijzigt mogelijk ook de interacties met het oppervlaktewatersysteem. Deze situaties lijden tot een complex conceptueel schema dat allicht enkel met numerieke (Q)3D modellering kan worden gemodelleerd.

Enkele belangrijke elementen die bepalend zijn in de keuze voor de modelaankpak:

- Omvang van de grondwaterwinning
- Wordt het grondwater gewonnen uit een freatische een afgesloten watervoerende laag?
- De wijze van aftoetsen van de verlaging aan bepaalde normen: volstaat “impact kleiner dan een drempelwaarde” of wordt er getoetst aan GxG waarden.
- De gelaagdheid en complexiteit van het hydrogeologische systeem
- Aard en complexiteit van de scenario's

De detailgraad van de hele studie moet coherent zijn, al kan de detailgraad van sommige onderdelen min of meer onafhankelijk worden gekozen. De indeling is gebaseerd op de wijze van aftoetsen van de impact, de gebruikte modeltechniek en de beschikbaarheid van terreinmetingen (grondwaterstandsreeksen).

Voor het aftoetsen t.a.v. referenties zijn twee benaderingen gebruikelijk:

- Verlaging aftoetsen aan een **drempelwaarde** ($< x$ cm). De verlaging mag dan niet groter zijn dan de drempelwaarde.
- Door het grondwatermodel berekende GxG aftoetsen aan **GxG referentiewaarden**. De verlaging mag niet buiten de minimum en/of maximum range van de referentiewaarden komen.

De output van de (model)berekeningen kunnen in drie groepen worden ingedeeld:

- Relatieve gemiddelde (tijdsafhankelijke) verlaging t.a.v. een referentiesituatie.
- Relatieve maximale (tijdsafhankelijke) verlaging t.a.v. een referentiesituatie.
- Gemiddelde (tijdsafhankelijke) grondwaterstand
- Tijdsafhankelijke grondwaterstanden (tijdsreeksen)

Wanneer voldoende lange tijd terreinmetingen worden uitgevoerd kunnen gemiddelde grondwaterstand en/of GxG's worden berekend.

Deze drie elementen (wijze van aftoetsen, modeloutput en beschikbaarheid van terreinmetingen) kunnen op verschillende manieren worden gecombineerd. Enkele van die combinaties worden hieronder beschreven en in Tabel 1 samengevat. Ze zijn gerangschikt volgens toenemende vereiste investering van tijd en middelen. Deze voorbeelden zijn slechts indicatief, er zijn uiteraard nog veel andere mogelijkheden.

- A: de gemiddelde extra verlaging als gevolg van de relatief beperkte grondwaterwinning wordt afgetoetst aan een drempelwaarde (bv. < 5 cm). Wanneer de verlaging kleiner is, wordt het effect van de grondwaterwinning als te verwaarlozen beschouwd. Deze eenvoudige benadering is mogelijk met een eenvoudige analytische formule, zonder kalibratie en terreinmetingen. Deze aanpak wordt gehanteerd voor de screening in de voortoets.
- B: de aanpak voor A kan ook worden toegepast voor tijdelijke winningen met een tijdsafhankelijke formule. Hierbij wordt gezocht naar de maximale verlaging en afgetoetst aan een drempelwaarde.
- C: wanneer een voldoende lange tijdreeks met terreinmetingen beschikbaar is om GG te berekenen, kan de gemiddelde verlaging als gevolg van de grondwaterwinning wordt opgeteld bij grondwaterstandsmetingen.
- D: wanneer een voldoende lange tijdreeks beschikbaar is om de GLG te berekenen, kan de maximale verlaging als gevolg van de grondwaterwinning worden opgeteld bij de GLG.
- E: Een snel opgebouwd schematische model (2D, 3D, numeriek of analytisch) met standaardwaarden voor de modelparameters kan een hydroloog inzicht geven in de mogelijke impact van een winning. Het model wordt niet gekalibreerd en er wordt geen gebruik gemaakt van gemeten tijdreeksen. Deze aanpak laat toe om in een meer complexe hydrologische situatie een snelle inschattingen te maken. Dit is meer flexibel dan analytische formules. Er is geen validatie met veldwaarnemingen en de berekende relatieve verlaging kan dus enkel afgetoetst worden aan een drempelwaarde.
- F: Een 3D tijdsafhankelijk model dat uitgebreid wordt gekalibreerd en gevalideerd kan voor elke locatie een gemiddelde grondwaterstand berekenen (GG). De modelberekeningen kunnen afgetoetst kunnen worden aan GG-referentiewaarden.

- G: Een 3D tijdsafhankelijk model dat uitgebreid wordt gekalibreerd en gevalideerd kan voor elke locatie GxG modelwaarden berekenen. Deze aanpak laat toe de modelberekeningen af te toetsen aan GxG-referentiewaarden.

Aandachtspunt voor 2D axi-symmetrische modellering: Wanneer het hydrologisch systeem niet uniform is in alle richtingen, moet het model uitgewerkt worden voor de richting met randvoorwaarden waarvoor de impact potentieel het verste reikt.

De twee volgende paragrafen zijn uitgewerkt voor respectievelijk eenvoudige analytische formules (1.2) en voor meer complexe grondwatermodellering, axi-symmetrisch, 3D of Q3D, analytische elementen of numeriek (1.3).

Tabel 1:

Typering van de methodiek						Aard van de modeloutput		
	Modeltechnisch	Hydrogeologie	Tijds-afhankelijkheid	Kalibratie	Tijdreeksen veldmetingen	Output	Betrouwbaarheid	Toets
A	Analytische formule	Eenvoudig	Nee	Nee	Nee	Gemiddelde relatieve verlaging	Laag	Drempel-waarde
B	Analytische formule	Eenvoudig	Ja	Nee	Nee	Maximale relatieve verlaging	Laag	Drempel-waarde
C	Analytische formule	Eenvoudig	Nee	Nee	Ja	Gemiddelde grondwaterstand	Laag	GG
D	Analytische formule	Eenvoudig	Ja	Nee	Ja	Maximale grondwaterstand	Laag	GxG
E	2D of 3D schematisch (numeriek of analytisch)	Eenvoudig	Nee	Nee	Nee	Gemiddelde relatieve verlaging	Beperkt	Drempel-waarde
F	3D gedetailleerd	Complex	Nee	Ja	Ja	Gemiddelde grondwaterstand (GG)	Hoog	GG
G	3D gedetailleerd	Complex	Ja	Ja	Ja	Absolute grondwaterstand (GxG)	Hoog	GxG

1.2 Eenvoudige analytische formules

De analytische formules zijn vrij eenvoudig en snel te berekenen. Daarom worden ze vaak gebruikt voor kleinere winningen in een eenvoudige situatie. Het intrekgebied van een beperkte (freatische) grondwaterwinning is niet zo heel groot waardoor de kans reëel is dat de assumpties voor de formules (o.a. hydrogeologisch horizontaal uniform) valabel zijn. Enige voorzichtigheid is wel vereist. De formules worden meestal beschreven voor de berekening bij pomproeven of het bepalen van het te verwachten debiet in een winningsput en niet voor de berekening van (beperkte) verlagingen van de grondwaterstand op grotere afstand.

De meeste formules gaan ervan uit dat aquifers en aquitards zich horizontaal oneindig uitstrekken en de mogelijkheden om de interacties met het oppervlaktewatersysteem te betrekken zijn beperkt. Sommige assumpties zijn te beschouwen als een 'worst case' aanname. Een voorbeeld hiervan is het negeren van de transfer vanuit het oppervlaktewatersysteem. Over het algemeen tempert het oppervlaktewatersysteem de verlaging als gevolg van een grondwaterwinning. Dit proces niet mee opnemen in de berekening is dan een worst case benadering.

In referentiewerken zijn formules terug te vinden voor uiteenlopende situaties, o.a. in Driscoll (1986) en op de website www.grondwaterformules.nl. Veelgebruikte formules zijn de formule van Thiem Dupuit, formule van Theis, formule van Hantush en formule van Neuman. De theoretische afleidingen van de formules is o.a. terug te vinden in Lebbe (1999) en De Smedt (2009).

Hieronder worden drie formules besproken die geregeld worden gebruikt voor grondwaterwinningen in freatische aquifers. Voor sommige formules zijn er online rekentools (bv. <http://www.grondwatertoolbox.nl/>).

Aandachtspunt: analytische formules worden vaak gebruikt met weinig informatie op het terrein. De waarden van de parameters moet steeds worden gekozen vanuit een 'worst case' benadering.

Aandachtspunt: de meest gebruikelijke analytische formules beschouwen uitsluitend horizontale grondwaterstroming. Ze geven dus geen informatie over de eventuele veranderingen in kwel (seepage).

Aandachtspunt: De meest gebruikelijke analytische formules gaan uit van een horizontale grondwaterstroming naar een volkomen put (tot aan de eerste aquitard). Hiervoor is eventueel een correctie mogelijk (bijvoorbeeld Driscoll (1986), p.250). Het effect is slechts relevant voor korte afstanden. Vanaf een afstand meer dan 2x de diepte van de winningsput is het verschil tussen een volkomen en een onvolkomen put te verwaarlozen.

1.2.1 De straal van het intrekgebied (freatische aquifer)

Bij een continue winning uit een freatische laag, zonder diep drainerende elementen, kan de gemiddelde straal van het intrekgebied (r) worden benaderd als de afstand waarbij het volume grondwater dat aan het systeem wordt onttrokken (Q) volledig wordt gecompenseerd door de grondwatervoeding uit netto neerslag (N) (De Smedt, 2009). Voor deze benadering zijn enkel het debiet van de winning en de grondwatervoeding vereist.

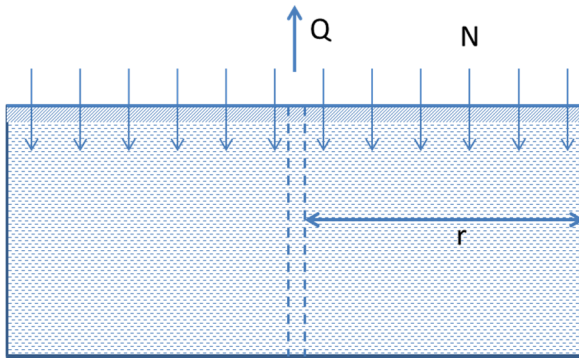
$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi R}}$$

Vergelijking 1

r = invloedstraal (m)

Q = onttrokken debiet (m³/d)

R = grondwatervoeding (m/dag).



Figuur 3: Straal van het intrekgebied voor een freatische aquifer

In werkelijkheid is het intrekgebied zelden volledig cirkelvormig, maar zolang de regionale grondwaterstroming of andere hydrologische processen het intrekgebied niet vertekenen is dit een werkbare benadering. Belangrijke voorwaarde is het freatisch karakter van de watervoerende laag. Het intrekgebied van een niet freatische laag kan in een heel ander gebied gelegen zijn.

Aandachtspunt: Voor de grondwatervoeding wordt best een conservatieve (lage) waarde gehanteerd. Batelaan et al. (2007) schat de grondwatervoeding in Vlaanderen gemiddeld op 220mm/jaar met een standaard afwijking van 83mm/jaar). Voor een vrij droog jaar met een retourperiode van 10 jaar betekent dit 116 mm/jaar. Dit is zonder rekening te houden met de lokale verschillen in grondwatervoeding uit netto neerslag.

Aandachtspunt: Deze uiterst eenvoudige formule geeft enkel de invloedsafstand voor een gemiddelde tijdsafhankelijke situatie. In de loop van een jaar kan de invloedsafstand groter zijn (bijvoorbeeld gedurende de zomerperiode met geringe aanvulling van het grondwater door infiltratie). Ook na opeenvolging van drogere jaren kan de invloedsafstand groter zijn.

Aandachtspunt: De voortoets gebruikt deze formule om de maximale afstand met invloed van een grondwaterwinning te berekenen.

1.2.2 Formule van Thiem/Dupuit - Verruijt

De formule van Verruijt (1970) is een uitbreiding van de formule van Thiem-Dupuit. De formule berekent de verlaging door een onttrekking uit een freatische watervoerende laag die uniform gevoed wordt met netto neerslag. Deze formule is erg handig om de gemiddelde verlaging te berekenen voor een continue winning. Het is een tijdsafhankelijke formule met 7 variabelen.

$$s_{(r)} = D - \sqrt{D^2 - \frac{Q}{\pi K_h} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right) - \frac{N}{2K_h} (r^2 - r_0^2)}$$

met $r_0 = \sqrt{\frac{Q}{\pi N}}$

$s_{(r)}$ = verlaging (m) op afstand r

r = afstand tot de onttrekking (m)

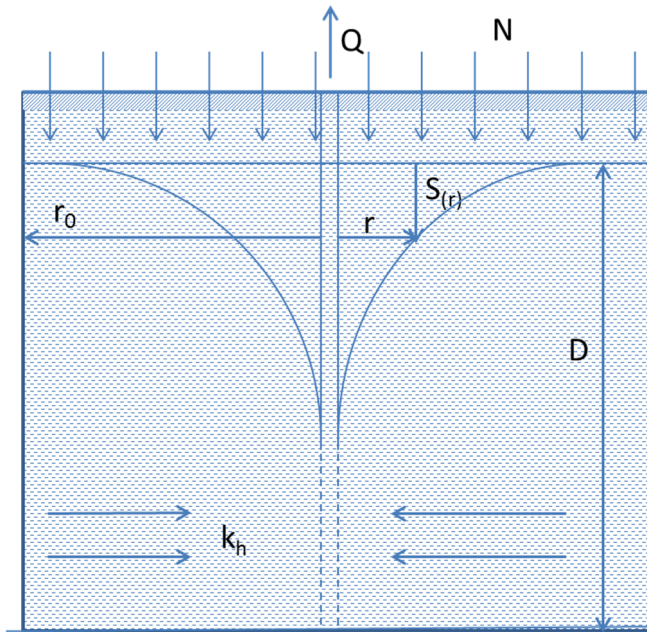
r_0 = de afstand (m) waarop de onttrekking geen noemenswaardige verlaging meer veroorzaakt (vaste wand). Hier wordt voor deze afstand de straal van het intrekgebied genomen (1.2.1).

Q = volume onttrekking (m^3/d)

D = (verzadigde) dikte van de watervoerende laag (m)

K_h = (horizontale) doorlatendheid (m/d)

N = grondwata aanvulling uit netto neerslag (m/d)



Figuur 4: Schematische voorstelling van de modelconcept van de formule van Verruijt (1970).

Deze formule wordt door de voortoets gebruikt en is geschikt om de verlaging in een freatische aquifer in te schatten.

Voor de netto neerslag wordt best een conservatieve (lage) waarde gehanteerd (1.2.1).

Aandachtspunt: Deze formule is tijdsafhankelijk en houdt dus geen rekening met verschillen in netto neerslag en onttrekking in de loop van het jaar. Voor onttrekkingen die hoofdzakelijk in de droge zomerperiode plaatsvinden geeft deze formule een onderschatting.

1.2.3 Formule van Theis

De formule van Theis (Theis, 1935) is zeer geschikt voor tijdelijke grondwaterwinningen of winningen die slechts enkele maanden of dagen per jaar in werking zijn (bijvoorbeeld een beregening). Doordat de formule geen aanvulling van grondwater bevat, wordt er geen evenwichtstoestand bereikt. De verlaging zet zich oneindig door en strekt zich steeds verder uit. Voor langdurige grondwaterwinningen is deze formule dan ook niet geschikt omdat op langere termijn de aanvoer uit netto neerslag of oppervlaktewater in rekening moeten worden genomen. De formule is bruikbaar voor freatische winningen op voorwaarde dat de verlaging (s) te verwaarlozen is t.a.v. de verzadigde dikte (D) ($s \ll D$). De formule van Theis staat hieronder beschreven zoals in het grondwaterzakboekje (Bot, 2011). De werking is goed beschreven op de website www.grondwaterformules.nl

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi K_h D} W(u)$$

$$\text{met } u = \sqrt{\frac{Sr^2}{4K_h Dt}}$$

s = verlaging (m) t.o.v. de uitgangssituatie op tijdstip t_0

r = afstand tot de onttrekking (m)

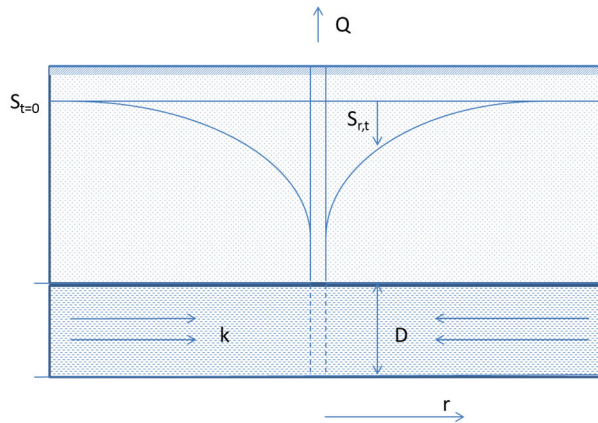
Q = onttrekking (m^3/d)

D = (verzadigde) dikte van de watervoerende laag (m)

K_h = (horizontale) doorlatendheid (m/d)

S = bergingscoëfficiënt (-)

t = tijd (d)



Figuur 5: Tijdsafhankelijke onttrekking (Theis)

$W(u)$ is de Well functie van Theis. Dit is een exponentiële integraal: $W(u) = \int_u^\infty e^{-y} \frac{dy}{y}$.

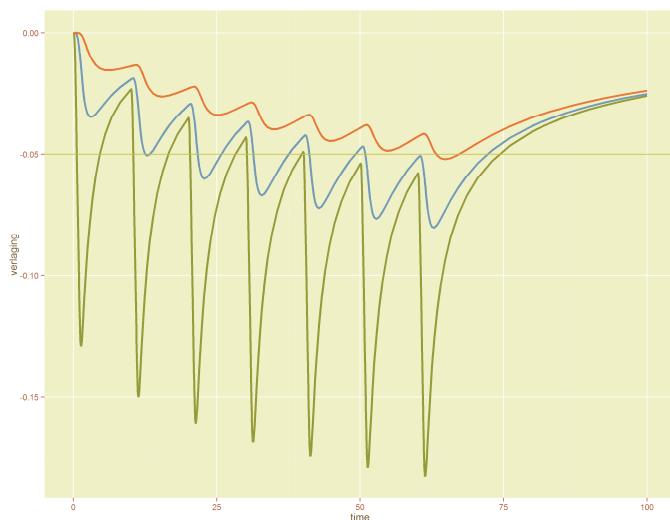
Als benadering van deze integraal kan de formule van Srivastava (Srivastava & Guzman-Guzman, 1998) worden gebruikt. De formule van Huisman (Huisman, 1972) is in deze context niet geschikt!

Formule van Srivastava & Guzman-Guzman (1998):

$$\begin{aligned} \text{voor } u \leq 1: \quad W(u) &= \ln\left(\frac{e^y}{u}\right) + 0.9653 u - 0.1690 u^2 \\ \text{voor } u \geq 1: \quad W(u) &= \frac{1}{u e^u} \frac{u + 0.3575}{u + 1.280} \\ y &= 0.57721 \dots \text{ de Euler - Mascheroni constante} \end{aligned}$$

De berekening is relatief eenvoudig, maar de onderstaande elementen verdienen de nodige aandacht.

Aandachtspunt: Bij een winning die gedurende een korte tijd, maar verschillende keren na elkaar actief is (bijvoorbeeld een beregening) is de tijd tussen de winningen niet altijd voldoende om terug te keren naar de uitgangssituatie (Figuur 6). Voor de ecohydrologisch impact zijn de effecten op voor een langere termijn van belang, niet de verlaging na slechts enkele uren of dagen pompen. De duur van de onttrekking (t) en het onttrokken volume per tijdseenheid (Q) moeten daarom op elkaar worden afgestemd. De duur van de onttrekking over de langere periode en het gemiddeld onttrokken volume over die periode.



Figuur 6: Verlaging door een niet-continue winning op drie afstanden (50m, 100m en 150m). De grondwaterwinning is periodiek: $Q = 300 \text{ m}^3/\text{d}$ gedurende 1 dag, $Q = 0 \text{ m}^3/\text{d}$ gedurende 9 dagen. Transmissiviteit ($Kh \cdot D$) = $100 \text{ m}^2/\text{d}$, bergingscoëfficiënt = 0.1. (Berekening met MLU 2.25, Hemker)

Aandachtspunt: De Well functie $W(u)$ wordt in sommige publicaties en software benaderd door de eenvoudige formule van Huisman ($W(u) = \ln(0.562/u)$, Huisman 1972). Deze formule is enkel bruikbaar nabij de

winning en bij een grote verlaging (bijvoorbeeld voor een pompproef). Voor ecohydrologische studies berekenen we vaak kleine verlagingen (bijvoorbeeld 5 cm) ver weg van de winning. De eenvoudige formule van Huisman geeft in deze situatie een onderschatting. Een voorbeeld: een winning van $100\text{ m}^3/\text{d}$ gedurende 50 dagen, $kD = 100 \text{ (m/d)}$ en $S = 0.3$ (-): Een verlaging van 5 cm wordt bereikt op 211m. Met de benaderende formule van Huisman is dit slechts 173m (82%). De benaderende formule van Srivastava (1998) is wel voldoende nauwkeurig.

Aandachtspunt: De eigenschappen van de aquifer (doorlatendheid, dikte en bergingscoëfficiënt) zijn meestal niet goed gekend. Het is sterk aanbevolen om hier op basis van de huidige kennis een 'worst case' benadering te hanteren en zo het maximaal mogelijk effect te berekenen. Dit kan door een parametercombinatie te zoeken met een maximale verlaging. Voor de formule van Theis geldt dat de verlaging maximaal is wanneer de transmissiviteit (k^*D) = Q . Door k^*D gelijk te stellen aan het opgepompte debiet wordt dus steeds een veilige waarde genomen. Ook wanneer de werkelijke waarde voor de transmissiviteit onbekend is. Voor de bergingscoëfficiënt geldt dat hoe groter de coëfficiënt, hoe kleiner het verlagend effect van de winning. Voor de bergingscoëfficiënt wordt dus best een lage, maar aannemelijke waarde gekozen.

Aandachtspunt: Hoe groter de bergingscoëfficiënt, hoe groter het vertragend effect van de verlaging. Dit betekent dat het effect van een (grote) winning op grote afstand ook na het stoppen van de winning nog enige tijd doorzet. Dit effect is relatief beperkt, maar met de formule van Theis onmogelijk te berekenen.

1.2.4 Rapportage voor analytische formules

De rapportage moet kort en bondig alle informatie bevatten om de berekeningen volledig te herhalen. De gebruikte formules, de bijhorende parameters en de waarden van de parameters worden helder weergegeven en gemotiveerd.

De rapportage omvat:

- Beschrijving van de situatie en de geplande ingreep
- Formulering van de doelstelling (wat wordt berekend en aan welke criteria worden de resultaten afgetoetst, welke scenario's worden bekeken, ...)
- Een eenvoudige beschrijving van de hydrogeologische opbouw en relevante hydrologische processen.
- Een (korte) bespreking van de keuze van het conceptueel model (vb. dwarsdoorsnede), de keuze van de analytische formule en de assumpties die worden gemaakt t.a.v. de hydrogeologische beschrijving.
- Een overzicht van de waarden voor elke variabele in formule en voor elk scenario (bij voorkeur in tabelvorm), een motivatie voor de keuze van de waarde van elke variabele en een bespreking hoe hierbij een 'worst case' benadering wordt gehanteerd.

Elke waarde voor de parameters wordt toegelicht met een motivatie en bronvermelding (eigen metingen, referenties uit literatuur,...). De waarden worden weergegeven in het SI stelsel of eenvoudig om te zetten afgeleiden (vb. de conductiviteit kan omwille van de leesbaarheid ook worden weergegeven in m/d i.p.v. in m/s). De gebruikte eenheden moeten wel consequent worden aangehouden. (niet afwisselend in m/d en dan weer in mm/u, ...).

Wanneer meerdere scenario's worden berekend moet elk scenario duidelijk worden gedefinieerd. Voor de definities van de scenario's kan de indeling van het MER richtlijnenboek –water worden gebruikt (1.2.3).

Elk scenario's mag slechts voor 1 variabele verschillen ten opzichte van een voorgaand scenario. Zo wordt steeds het effect van elke variabele weergegeven en kunnen de uitkomsten van de scenario's makkelijk worden vergeleken.

1.3 Complexe grondwatermodellering (numerieke of analytisch)

Alles wat niet beperkt is tot een eenvoudige analytische formule. Dus ook eenvoudige numerieke berekeningen (2D, axi-symmetrisch, analytische elementen), ...

1.3.1 Systeemanalyse en conceptueel model

De systeemanalyse is een beschrijving van het grondwatersysteem, de hydrogeologische opbouw en de hydrologische en hydraulische processen die een rol spelen in het studiegebied. Voor de systeemanalyse wordt gebruik gemaakt van allerhande beschikbare informatie en databronnen. De systeemanalyse laat toe om de gepaste keuze te maken voor de volgende stappen in het modelleringsproces.

De detailgraad van de beschrijving hangt af van de complexiteit van het systeem, de doelstellingen van de modellering en beschikbare informatie. Als algemene regel wordt de systeemanalyse zo eenvoudig mogelijk gehouden. Teveel details dragen niet bij tot een beter inzicht in het grondwatersysteem.

De systeemanalyse is niet beperkt tot een beschrijving van de huidige situatie. Ook de inschatting over de toekomstige situatie, na de ingreep, moet opgenomen worden in de beschrijving.

Het gebied van de systeemanalyse moet voldoende groot worden gekozen en het hele studiegebied omvatten (zowel geografisch als in de diepte) zodat alle mogelijke invloeden van de ingreep zeker worden omvat.

De systeemanalyse omvat een beschrijving van:

- de globale hydrogeologische opbouw;
- de waarden voor de dikte, doorlatendheid en berging van de hydrogeologische lagen;
- de interactie(s) met het oppervlaktewatersysteem;
- de mogelijke effecten van de ingreep

De resultaten van de systeemanalyse worden best geïllustreerd met een of meerdere schematische dwarsdoorsneden waarin de hydrogeologische opbouw van het studiegebied en de relevante hydrologische processen worden aangeduid.

Voor een groot studiegebied is het aangewezen om het grondwatersysteem op te splitsen in een regionaal en één of meerdere lokale schema's. Bij grote verschillen tussen verschillende periodes kunnen voor elke periode een afzonderlijk schema's worden gemaakt.

In de bijlage II van het MER richtlijnenboek - Water (Van de Broeck et al., 2011) worden een reeks databronnen opgesomd die gebruikt kunnen worden voor uitwerken van een beschrijving van het grondwatersysteem. Hieronder worden de belangrijkste overlopen met enkele extra databronnen, specifiek voor ecohydrologische studies.

Aandachtspunt: voor ecohydrologische studies zijn de ondiepe hydrologische processen ter hoogte van het maaiveld zeer belangrijk, zoals de interacties met het oppervlaktewatersysteem en het al dan niet voorkomen van kwel. Paragraaf 1.3.1.6 geeft een overzicht van veelvoorkomende hydrologische processen en hoe deze schematische kunnen worden weergegeven.

1.3.1.1 Hydrogeologische opbouw

De belangrijkste bron voor de geologische en hydrogeologische opbouw van de ondergrond in Vlaanderen is de Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV) (<http://dov.vlaanderen.be>). De website van DOV geeft voor elke HCOV code (Hydrologische Codering Ondergrond Vlaanderen) de basis en de dikte van de lagen. De geologische indeling is volledig in 3D kaarten beschikbaar. Naast de kaarten zijn ook de individuele boorbeschrijvingen beschikbaar.

Richtwaarden voor de verticale en horizontale doorlatendheid en de bergingscoëfficiënt voor de HCOV-hoofdeenheden en -subeenheden worden gegeven in bijlage I van Lebbe & Vandenbohede (2004). Zie ook MER richtlijnenboek Water - §5.3.4.1 voor de grootteorde van de doorlatendheid van verschillende bodemtypes.

Aandachtspunt: De hydrogeologische eigenschappen van de watervoerende lagen zijn niet overal goed gekend. Mogelijk is lokale informatie beschikbaar (bijvoorbeeld na een pompproef). Belangrijk is dat de waarde voor alle variabelen over de ondergrond worden gemotiveerd en gerefereerd.

1.3.1.2 Topografie en oppervlaktewatersysteem

De hoogte van het topografisch oppervlak is cruciaal voor een hydrologisch model dat ondiep grondwater modelleert. AGIF stelt zeer gedetailleerde digitale hoogtemodellen ter beschikking (www.agiv.be) met een spatiale resolutie tot 1m.

Aandachtspunt: Dit hoogtemodel is zeer gedetailleerd, maar vereist in sommige gevallen nog een aanpassing voor toepassing in een grondwatermodel (vb. aanpassing van het DHM bij bruggen over kanalen en rivieren).

1.3.1.3 Grondwaterstanden en stijghoogtes

Beschrijving van de diepte en de dynamiek van de grondwaterpeilen op meetlocaties in het studiegebied.

De monitoring van grondwaterpeilen in Vlaanderen wordt ingedeeld in verschillende meetnetten. Een groot deel van de peilmetingen in deze meetnetten is online publiek beschikbaar en eenvoudig op te vragen via DOV (<http://dov.vlaanderen.be>).

- **Meetnet 1:** (het primair meetnet, VMM). De meetpunten van het primaire meetnet zijn geselecteerd om informatie te leveren over belangrijke watervoerende lagen voor het opvolgen van de grondwaterreserves. De meetfrequentie is meestal maandelijks. Het is geschikt voor een regionaal inzicht in de grondwaterstanden.
- **Meetnet 3:** Dit meetnet bevat meetpunten van tijdelijke studies en opdrachten. Het bevat o.a. de meetresultaten van de ecologische inventarisatie en visievorming van de grotere onbevaarbare waterlopen in het kader van het integraal waterbeheer.
- **Meetnet 8:** (freatisch grondwatermeetnet, VMM). Dit meetnet bevat meetpunten met filters in freatische lagen. De filters zijn vrij ondiep, vaak met meerdere meetpunten op verschillende dieptes. Dit meetnet is vooral gericht op landbouwgebied. De peilen worden slechts enkele keren per jaar opgemeten (2 tot 6 keer).
- **Meetnet 9:** (Meetnet INBO, ANB en natuurorganisaties). Dit meetnet bevat voornamelijk meetpunten in (natte) natuurgebieden met ondiepe filters (1 tot maximaal 5m). Dit meetnet biedt inzicht in de grondwaterdynamiek op zeer lokale schaal. De lengte van de tijdreeksen is vaak beperkt tot enkele jaren, meestal opgemeten in functie van een gebiedsgericht project. In een beperkt aantal gebieden zijn veel langere tijdreeksen beschikbaar.

Mogelijk bieden ook metingen uit andere meetnetten geschikte informatie, maar deze zijn niet altijd onmiddellijk publiek beschikbaar (vb. rechtstreeks van bedrijven of drinkwatermaatschappijen) en/of vergen ze een extra kwaliteitscontrole (vb. meetnet 2 van VMM). De aanvraag voor data verloopt via VMM of via de respectievelijke eigenaar/beheerder van de meetpunten.

De meetlocaties van meetnet 9 in DOV zijn een selectie van de meetlocaties in de Watina+ databank van INBO. Informatie over bijkomende meetpunten kan worden bekomen via <http://www.inbo.be> → dienstverlening → databanken → Watina+.

1.3.1.4 Grondwaterwinningen in de omgeving van het projectgebied

Een passende beoordeling moet rekening houden met cumulatieve effecten. Dit betekent o.a. dat de effecten van andere grondwaterwinningen meegenomen moeten worden in de analyse (zie ook MER richtlijnenboek Water §5.3.4.6)

De geografische ligging, de vergunde dag- en jaardebieten, de HCOV code waarin in de filter is geplaatst en de diepte van de filter zijn online te consulteren via DOV (<http://dov.vlaanderen.be>).

Aandachtspunt: Een kritisch nazicht van de vermelde gegevens over de watervoerende laag is noodzakelijk. De vermelde ontgonnen watervoerende laag en de diepte van de filter worden best vergeleken met de hydrogeologische opbouw (zie ook aandachtspunt uit het MER richtlijnenboek Water §5.3.4.6).

1.3.1.5 Extra kennis en studies over het studiegebied

Voor heel wat natuurgebieden zijn in het verleden eco-hydrologische studies uitgevoerd. Het INBO maakte in opdracht van ANB een inventarisatie van het merendeel van de eco-hydrologische studies in SBZ gebieden (De Bie et al., 2011). Het doel van de inventarisatie is een stand van zaken over de inzichten in het hydrologisch functioneren van de gebieden en de rol van de waterlopen daarin te duiden. De inventarisatie omvat o.a. hydrogeologische studies, ecohydrologische studies, ecologische inventarisaties, ecosysteemvisies, waterbeheerplannen, (deel)bekkenbeheerplannen, rivierherstelprojecten, en natuurrichtplannen. De referenties van deze studies werden samengevoegd in een databank. Het gaat om een geodatabank waarbij zowel ruimtelijk (via een GIS-component) als op naam kan worden gezocht.

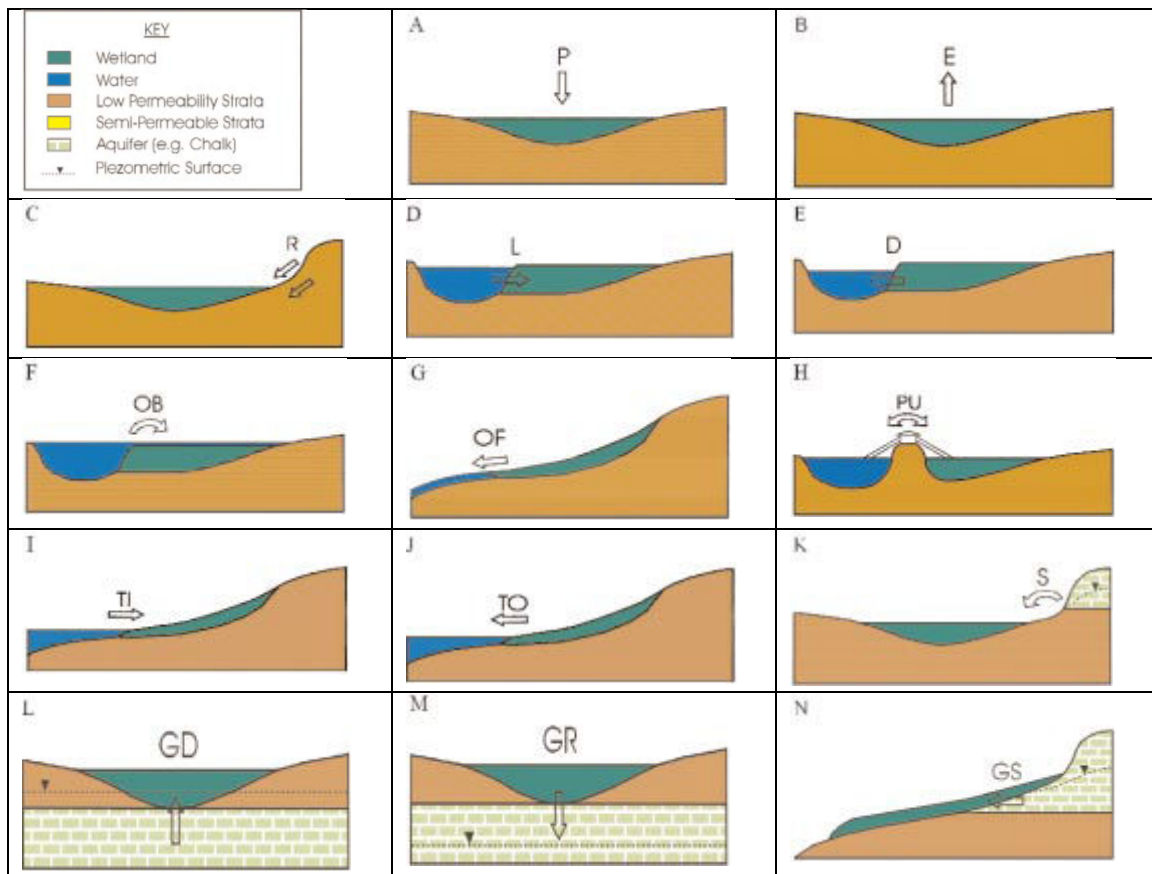
1.3.1.6 Conceptueel model

Iteratief wordt de informatie over het grondwatersysteem gebruikt om te komen tot een conceptueel model van het studiegebied. Dit conceptueel model is nog geen rekenmodel, maar een schematische

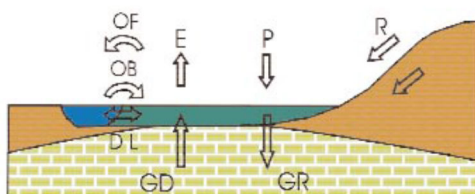
vereenvoudiging van de reële fysische processen. Hier wordt de afweging gemaakt om bepaalde processen wel of niet op te nemen in het model.

Hieronder worden twee voorbeelden gegeven om het conceptueel model in te delen en in schema's uit te werken:

Acreman & Miller (2006) geeft een overzicht van 14 verschillende water transfers. (Figuur 7). In één gebied komen steeds meerdere transfers voor, maar nooit allemaal tegelijk. De individuele processen zijn de bouwstenen om het hydrologisch functioneren van een gebied schematisch voor te stellen (Figuur 8). Het is zeer geschikt voor schema's op lokale schaal. Wanneer gebiedspecifieke metingen beschikbaar zijn, kan het relatieve belang van elk van de transfers aangegeven worden en eventueel waterbalansen berekend. Ook de verschillen tussen de winter en de zomersituatie kunnen worden aangeduid.



Figuur 7: Water transfer mechanismen (naar Acreman & Miller, 2006 – toelating van auteurs voor reproductie).



Figuur 8: Voorbeeld van schematische voorstelling van de (kwantitatieve) hydrologische processen in verschillende wetlands (naar Acreman & Miller, 2006).

Een meer regionale indeling voor grondwatersystemen wordt gehanteerd in de “Voorstudie waterkwantiteitsdoelstellingen voor de Speciale Beschermingszones (SBZ-H)” (De Bie et al., 2011). Er worden drie groepen onderscheiden: valleigebieden, poldergebieden en andere. Elk van deze groepen wordt onderverdeeld in meerdere categorieën. De indeling is gebaseerd op de complexiteit van het grondwatersysteem en dus op de vereiste complexiteit voor een grondwatermodellering in het gebied.

- Valleigebieden
 - B-vallei: De vallei is helemaal in de bovenloop van het bekken gesitueerd en de waterloop ontvangt enkel water van de hellingen. De vallei is typisch smal en de waterloop typisch ondiep. Kwel is er niet uit te sluiten. Het is een relatief eenvoudig hydrologisch systeem.
 - S-Vallei: Relatief smal valleigebied met één waterloop die bepalend is voor het hydrologisch systeem. Kwel kan aanwezig zijn, maar een één-op-één relatie tussen het ondiep grondwater en de waterloop wordt verwacht. De relatie kan met relatief eenvoudige middelen achterhaald worden.
 - M-Vallei: Het ecohydrologisch systeem en de grondwaterpeilen worden bepaald door meerdere waterlopen. Het betreft meestal bredere valleigebieden, maar er wordt ingeschat dat een lokale interactie met de waterlopen dominant is voor de grondwaterpeilen.
 - L-Vallei: Het valleigebied wordt doorstroomd door een relatief grote rivier, waarvan de karakteristieken bepaald worden door processen in een relatief groot achterliggend stroombekken. Het ecohydrologisch systeem wordt mogelijk bepaald door meerder processen en meerdere waterlopen, maar verwacht wordt dat de grote rivier dominant is.
 - C-Vallei: Bij complexe valleisystemen is het nu onduidelijk hoe ze hydrologisch functioneren en welke de bepalende factoren zijn voor de grondwaterpeilen. Er wordt geen één-op-één-relatie verwacht tussen waterlopen en grondwaterpeilen, doordat verschillende processen en randvoorwaarden ingrijpen: waterlopen, stilstaande wateren, grondwaterprocessen, kwel, geologische opbouw, sedimentkarakteristieken, topografie, etc.
- Poldergebieden
 - E-polder: is een poldergebied met een relatief eenvoudig hydrologisch systeem: de waterpeilen in de waterlopen worden er bepaald door 1 punt (stuw, pomp of gravitair) en het grondwater staat ongeveer pas.
 - C-Polder: is een polder met een ingewikkelder hydrologisch systeem; ook bijvoorbeeld kwel, zoutintrusies, eventueel complexere gravitaire afwatering kunnen een rol spelen in het hydrologisch systeem.

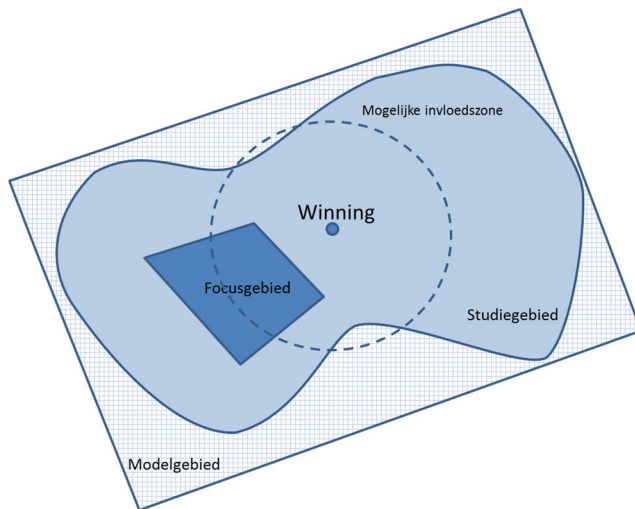
Vaak is het onzeker of bepaalde processen in een gebied belangrijk zijn of niet. Ook de kennis over hydrogeologische opbouw kan lacunes bevatten (vb. komt een bepaalde afsluitende laag al dan niet gebiedsdekkend voor). Het is mogelijk om meerdere systeemanalyses uit te werken en de resultaten van de verschillende modellen naast elkaar te leggen. De verschillen tussen de modellen geven dan inzicht in de onzekerheid die het gevolg is van de beperkte kennis over het grondwatersysteem (i.e. modelonzekerheid). Eventueel kan later in het modelleringsproces een definitieve keuze worden gemaakt.

Het reduceren van belangrijke onzekerheden met een grote invloed op de modelresultaten (vb. door pompproeven) kan expliciet in de doelstellingen van de studie worden opgenomen.

De fase van systeemanalyse en het conceptueel model omvatten een beschrijving van de volgende elementen van het grondwatersysteem:

- De **horizontale grenzen van het studiegebied**: Een beschrijving en motivering van de modelgrenzen. Een beschrijving van het focusgebied, i.e. de zone waarbinnen de resultaten van het model gebruikt zullen worden en dus voldoende betrouwbaar moeten zijn.
- Beschrijving van de **hydrogeologische opbouw van het studiegebied**. De ligging en de dikten van de hydrogeologische lagen en de (range) van de waarden voor de relevante hydrogeologische variabelen (doorlatendheid, transmissiviteit, bergingscoëfficiënt, ...).
- Beschrijving van de belangrijkste **water transfer mechanismen**. De in- en output van het systeem en de transfers binnen het studiegebied.
- Beschrijving van de **interactie met het oppervlaktewatersysteem**. De grote en kleine rivieren, drainagesysteem, meren, vennen, ...
- Beschrijving van de **infiltratie- en kwelgebieden**

- Beschrijving van het grondwatersysteem op verschillende **tijdstippen** (vb. zomer- en winterperiode)
- Beschrijving van de veranderingen als gevolg van **scenario's** of de geplande ingreep.



Figuur 9: Onderscheid studiegebied (lichtblauw), focusgebied (donkerblauw), invloedszone (onderbroken lijn) en modelgebied (gespikkeld).

1.3.2 Ontwerp en uitwerking

In de ontwerp- en uitwerkingsfase worden de fysische processen en eigenschappen uit het conceptueel model vertaald in een kwantitatieve mathematische structuur. De wijze waarop hangt af van het type modellering. Op basis van het conceptueel model en de doelstelling van het project wordt een doordachte keuze gemaakt uit alle methodologische opties. Het is een kwestie van de meest eenvoudige methode te kiezen die toch geschikt is voor de doelstellingen van de studie.

1.3.2.1 Tijdsafhankelijk (transient state) of tijdsafhankelijk (steady state)

Een grondwatersysteem (met name het ondiepe grondwater) evolueert steeds naar een dynamisch evenwicht, maar bereikt dit vrijwel nooit. Een tijdsafhankelijk model is in die zin realistischer, maar ook meer complex. Er zijn extra (onzekere) parameters (bergingscoëfficiënten) en is moeilijker te kalibreren. De extra complexiteit moet dus echt een meerwaarde bieden, zo niet wordt best een robuust tijdsafhankelijk model overwogen.

Tijdsafhankelijke modellen zijn vooral vereist om het effect van een tijdelijke of veranderlijke externe stress te analyseren (bv. grote kortlopende bemaling, veranderende invloed van het oppervlaktewatersysteem, ...). Het kan ook noodzakelijk zijn om de dynamische standplaatsvariabelen (GxG's) te berekenen.

Aandachtspunt: Sommige studies trachten de dynamiek van het grondwater te modelleren door twee tijdsafhankelijke modellen te combineren: één voor een zomersituatie en één voor de wintersituatie. Deze aanpak vermijdt de complexiteit van een tijdsafhankelijk grondwatermodel en geeft toch inzicht in de grondwaterdynamiek, bijvoorbeeld voor het schatten van een waarde voor GLG en GHG. Een grondwatermodel voor een zomer- of wintertoestand stelt echter per definitie geen evenwichtssituatie voor. De modellen worden voor een bepaalde periode in het jaar gekalibreerd door de grondwatervoeding uit neerslag aan te passen en te fitten op de veldmetingen. Het voorspellend vermogen van een dergelijk model is echter beperkt. Deze methode kan praktisch zijn nut bewijzen, maar het vereist een uitgebreid en betrouwbaar meetnet in het studiegebied. Het voorspellende vermogen van een dergelijke modellering is beperkt.

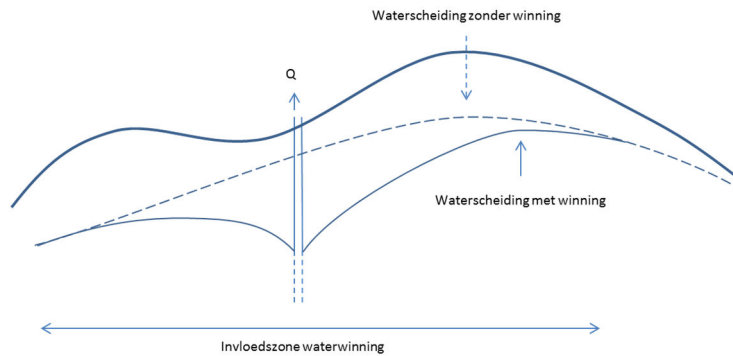
1.3.2.2 Modelgrenzen (horizontaal)

De keuze van de randvoorwaarden aan de modelgrenzen hebben een invloed tot ver in het gemodelleerde gebied. De modelgrenzen worden best gekozen met een ruime buffer rond het studiegebied. Hoe groter de onzekerheden over de randvoorwaarden, hoe groter de vereiste buffer rond het focusgebied (Figuur 9).

De modelgrenzen worden veelal gekozen daar waar men specifieke hydrologische kenmerken kan veronderstellen, bijvoorbeeld een (**grote**) rivier die nauw in contact staat met een niet afgesloten aquifer, op

de **waterscheidingslijn** tussen twee stroomgebieden of **parallel aan de grondwaterstroming**, wanneer voldoende informatie beschikbaar is over de richting van de grondwaterstroming.

Aandachtspunt: ingrepen in het grondwatersysteem kunnen de interactie met het oppervlaktewatersysteem wijzigen en de ligging van de waterscheiding verplaatsen (Figuur 10). De modelgrens moet voldoende ver van de invloedssfeer van de winning liggen zodat het eventueel effect verwaarloosbaar is.



Figuur 10: Invloed van een grondwaterwinning op de ligging van de waterscheiding.

1.3.2.3 Horizontale discretisatie - spatiale resolutie

De geschikte resolutie voor de discretisatie van het model (de grootte van de rekencellen of de afstand tussen de knooppunten) hangt af van de topografische gradiënten, de gradiënt van de stijghoogte (vb. nabij een winning of nabij een waterloop) en de hydrogeologische complexiteit.

Een eerste reden om de ruimtelijke discretisatie voldoende klein te houden is het beperken van de numerieke fouten. Het is niet nodig om voor het hele modelgebied een zeer gedetailleerde spatiale resolutie te hanteren. Lokale verfijning van de resolutie kan de rekentijd van een model sterk reduceren zonder af te dingen op de nauwkeurigheid. Numerieke modellen gebaseerd op eindige elementen methode (FEM) (vb. MicroFem) zijn meer flexibel om de spatiale resolutie lokaal te verfijnen dan modellen die de eindige verschillen methode (FDM) (vb. Modflow). De eindige verschillen methode verdeelt het studiegebied in een raster met rechthoekige cellen. De lokale verfijning strekt zich daarbij horizontaal en verticaal uit tot aan de modelgrenzen. Recente software (Modflow-LGR, Modflow-USG, ...) is iets flexibeler in de lokale verfijning. Een tweede reden om de ruimtelijke discretisatie te verfijnen is om in het focusgebied de grondwaterstand te berekenen tot op standplaatsniveau. Hiervoor moet de topografie en alle hydrologische processen op dezelfde fijne resolutie worden ingevoerd.

Aandachtspunt: Door de snelle toename van de rekenkracht is de rekentijd steeds minder een beperkende factor en wordt in het modelgebied vaak één vaste en hoge resolutie gebruikt. Een hoge spatiale resolutie in het hele modelgebied levert ogenschijnlijk een hogere detailgraad, maar draagt niet essentieel bij tot het verbeteren van de modelresultaten.

Aandachtspunt: De output van het model moet in staat zijn om in het focusgebied relevante informatie te leveren over de grondwatercondities op standplaatsniveau. Afhankelijke van de topografische variatie en de hydrologische complexiteit varieert de geschikte resolutie voor het focusgebied tussen 10m tot 50m.

Aandachtspunt: Bij lokale verdichting wordt aangeraden om het verschil in volume tussen naburige cellen te beperken tot een verhouding 1.5.

1.3.2.4 Verticale indeling en gelaagdheid

Wanneer de verticale grondwaterstroming te verwaarloosbaar is, volstaat één modellaag per aquifer of aquitard. Wanneer de verticale stroming binnen de modellagen wel belangrijk is moeten de verschillende hydrogeologische eenheden opgedeeld worden in meerdere modellagen. Elke hydrogeologische eenheid wordt dan best opgedeeld in twee of meer modellagen. Dit geldt zeker voor het correct modelleren van de variatie in stijghoogte in dikke vrij slecht doorlatende systemen.

1.3.2.5 Topsyteem

Voor ecohydrologische studies is het topsysteem van het grondwatermodel cruciaal. Het topsysteem bepaalt hoe de bovenste laag (of lagen) van het grondwatermodel interageren met het oppervlaktewatersysteem en het topografisch oppervlak. Het topsysteem bepaalt hoe drainagesloten, irrigatiesloten, kanalen, vennen en plassen, seepage, discharge of kwel in het model worden ingevoerd. De opties voor het topsysteem verschillen naargelang de modeltechniek en de software. Er is niet één enkele goede manier om het topsysteem te modelleren, maar het is belangrijk dat hieraan de nodige aandacht wordt besteed en goed wordt beschreven.

In het topsysteem worden een drainagediepte (diepte van de sloten of van het waterpeil), een infiltratieweerstand en een drainageweerstand ingevoerd. De drainageweerstand is een maat voor de dichtheid aan afvoersloten per gebied, de aard van de (slib)bodem van de sloten en de doorlatendheid van de ondergrond ter hoogte van deze sloten.

Het is belangrijk dat kwel of seepage goed in het model gedefinieerd is. Een grondwaterwinning kan beperkte invloed hebben op de grondwaterstand, maar wel een invloed hebben op de hoeveelheid kwel en zo de verhouding tussen de invloed van regenwater en de invloed van grondwater verstoren.

In Modflow zijn er klassiek drie specifieke packages voor het topsysteem: RIVER, DRAIN en SEEPAGE (Batelaan & De Smedt, 1998).

Aandachtspunt: In sommige software moeten de cellen die tijdens de iteraties droogvallen (omdat het grondwater onder de basis van de cel zakt), opnieuw 'rewetted' worden. Zo niet worden deze in het verdere iteratieproces inactief.

Grondwatermodellen berekenen in principe uitsluitend het grondwater in de verzadigde bodemzone. Sommige modellen kunnen ook het water in de onverzadigde bodem berekenen. Om de impact van winningen of bemalingen in te schatten zijn de veranderingen in de onverzadigde zone achter minder belangrijk.

Aandachtspunt: Voor een ecohydrologische analyse is niet zozeer de absolute waarde van de stijghoogte van belang, maar wel de diepte van het grondwater onder het maaiveld. Om een realistische benadering van de grondwaterstand te bekomen mag de bovenste modellaag niet al te dik zijn. Zeker niet wanneer deze weinig doorlatend is. Het is aangewezen om bovenste modellaag op te splitsen in twee of meerdere lagen.

1.3.2.6 Temporele discretisatie

Wanneer gekozen wordt voor een tijdsafhankelijk grondwatermodel (transient state) moet de tijdsdiscretisatie (de lengte van de tijdstappen) voldoende klein zijn om numerieke fouten in het model te beperken. Hierbij wordt rekening gehouden met de omvang en het tijdstip van de wijzigingen in het model (vb. het starten of stoppen van een winning).

Op langere termijn blijkt in de praktijk een wekelijkse of tweewekelijkse tijdstap geschikt. Net na een sterke wijziging in het grondwatersysteem kan (tijdelijk) een kortere tijdstap vereist zijn. De tijdstappen komen best overeen met de meetfrequentie van de stijghoogtemetingen (meestal maandelijks tot tweewekelijks) die gebruikt worden voor de kalibratie.

Aandachtspunt: Een belangrijk criterium voor de geschikt duur van de tijdstappen is de afwezigheid van numerieke problemen en een minimale fout op de massabalans tussen iedere tijdstap.

Aandachtspunt: De gewenste temporele resolutie van de modeloutput. Wanneer het tijdsafhankelijk model dient om grondwaterdynamische variabelen te berekenen (vb. GxG's) moet daar bij de keuze van de tijdstap rekening mee gehouden worden.

1.3.2.7 Grondwatervoeding

De grondwatervoeding uit neerslag is de belangrijkste aanvoer van water in het grondwatersysteem. Het is een belangrijke randvoorwaarde voor een grondwatermodel. De grondwatervoeding hangt af van het bodemtype, het landgebruik en de grondwaterstand.

De meest eenvoudige aanpak om de grondwatervoeding in een grondwatermodellering in te voeren is de **gemiddelde grondwatervoeding**. In Vlaanderen wordt de gemiddelde grondwatervoeding geschat op 222 mm/jaar (standaard afwijking +/- 80) (Batelaan et al., 2007). De grondwatervoeding varieert echter zeer sterk van plaats tot plaats. Het is daarom aangewezen om de grondwatervoeding aan te passen aan het studiegebied.

Een kaart met de **gedistribueerde grondwatervoeding** voor Vlaanderen werd berekend door Batelaan et al. (2007).

Een alternatieve methode voor de berekening van de grondwatervoeding is het softwarepakket SWAP (Soil, Water, Atmosphere, Plant – <http://www.swap.alterra.nl>). SWAP is een 1D-model dat gewasgroei en de stroming doorheen de onverzadigde zone simuleert met de Richards-vergelijking. De VMM beschikt voor een aantal locaties over een voor verschillende combinaties voor bodemtype en landgebruik.

De grondwatervoeding hangt deels af van de grondwaterstand. De grondwatervoeding wordt daarom best iteratief berekend op basis van de output van het grondwatermodel.

1.3.2.8 Initiële waarden

Afgezien van eventuele rekentechnische problemen hebben de initiële waarden bij een tijdsafhankelijk model (steady state) geen invloed op het eindresultaat. Voor tijdsafhankelijke modellen (transient state) is de keuze van de initiële waarden wel zeer belangrijk. Vaak zijn de initiële condities slecht gekend en niet in evenwicht met de randvoorwaarden van het model.

Na het doorlopen van een aantal tijdstappen (burn-in) hebben de initiële condities vrijwel geen invloed meer op het modelresultaat.

Aandachtspunten: Als initiële conditie voor een tijdsafhankelijk model kunnen de modeluitkomsten van een tijdsafhankelijk model worden gebruikt.

1.3.3 Specifieke aandachtspunten

- Invloed van getijdenwerking op grondwaterstanden: de kust, de schelde tot in Gent en enkele zijrivieren van de Schelde zijn van de Schelde zijn onderhevig aan getijwerking. Het effect van het getij moet in rekening worden genomen, zowel in tijdsafhankelijke als in tijdafhankelijke modellering.
- Controle of de pompput niet droogvalt. De meeste software zal hier niet voor waarschuwen.
- De meeste grondwatermodellen veronderstellen een constante densiteit van het water in het systeem. Grondwater met een hoge saliniteit (nabij de kust of in sommige polders) heeft een hogere densiteit. Een grondwatermodel voor regio's met een grote variatie in densiteit moet hier rekening mee houden.

1.3.4 Modelkalibratie

Kalibratie is een vast onderdeel van hydrologische modellering. De initiële waarde van een aantal modelparameters wordt aangepast zodat de modelresultaat beter overeenkomt met de veldwaarnemingen. De veldwaarnemingen zijn hoofdzakelijk stijghoogtemetingen, maar ook hydraulische waarnemingen (waterstanden en debieten in de waterlopen) zijn erg belangrijk voor een goede kalibratie. Sommige indirecte waarnemingen en 'soft data' (bv. vegetatiegegevens), zijn eveneens bruikbaar om de ruimtelijke variatie in de voorspelde watertafeldieptes en kwelfluxen af te toetsen.

De kalibratie-inspanning en de methode kan sterk verschillen. In de meeste gevallen wordt een manuele, half- of volautomatische kalibratie uitgevoerd. Voor een snelle schematische modellering kan het volstaan om aannemelijke waarden voor de parameters uit bestaande referenties te gebruiken, zonder verder te kalibreren.

Bij de start van het kalibratieproces worden de belangrijkste onzekere parameters geselecteerd voor kalibratie. De range met parameterwaarden waarbinnen deze kalibratie plaatsvindt moet aannemelijk zijn en wordt bij aanvang vastgelegd. Wanneer de nauwkeurigheid van het model na kalibratie niet volstaat moet het conceptueel model worden herzien en/of extra terreinkennis worden verzameld.

Het kalibratieproces heeft als doel het voorspellend vermogen van het model te verbeteren. Het model wordt immers gebruikt om effecten in een toekomstige stress situatie te voorspellen. Wanneer de kalibratie te sterk wordt doorgedreven bestaat de kans op 'overfitting'. Dit verbetert de fit voor de huidige situatie, maar gaat onherroepelijk ten koste van het voorspellende vermogen van het model.

De complexiteit van het model moet in verhouding staan met de beschikbare data voor kalibratie en evaluatie. Hoe complexer het model hoe meer parameters er geschat moeten worden. Bij gebrek aan data bestaat het risico dat een model tijdens het kalibratieproces wordt 'gekneed' totdat een combinatie van parameters een goed resultaat geeft. Dit is echter geen garantie op een model dat ook goed is in het voorspellen van een toekomstige situatie.

Aandachtspunt: Zonder controle van de waterbalans en hydraulische informatie kan een modelkalibratie zeer onrealistische waarden opleveren voor de interactie met het oppervlaktewatersysteem. Stijghoogtemetingen geven hierover relatief weinig informatie. De afvoergegevens van waterlopen geven heel andere informatie over het systeem dan stijghoogte gegevens. Een kalibratie met meerdere types data leidt tot een robuuster model en helpt het veelvoorkomende probleem van 'non-uniqueness' te voorkomen (zie verder) (Figuur 12).

Aandachtspunt: De locaties voor de kalibratie moeten goed verspreid zijn over het hele modelgebied en niet beperkt tot het focusgebied. Een slechte spreiding van de meetlocaties leidt tot een onevenwichtige kalibratie. Geclusterde meetlocaties kan men een lager gewicht geven in de kalibratie dan de overige meetlocaties.

Een formele verificatie van de modelparameters is pas mogelijk wanneer er voldoende metingen zijn voor veel meetlocaties, verspreid over het hele modelgebied. In dat geval kunnen de metingen worden gesplitst in een 'kalibratie-' en een 'verificatiedataset'. Vaak ontbreken de nodige metingen en kunnen de parameterwaarden niet volledig onafhankelijk worden getoetst.

Aandachtspunt: Bij grondwatermodellering worden in de praktijk vaak alle beschikbare metingen gebruikt voor het kalibratieproces. De statistieken en figuren ("modelled versus measured") moeten duidelijk aangegeven welk deel van de dataset werd gebruikt: de hele dataset, de kalibratiedataset of een verificatiedataset.

De beschrijving van de kalibratie omvat de lijst met parameterwaarden die worden gekalibreerd, de initiële waarden, de range en eventueel de verdeling waarbinnen de parameters worden gevarieerd, een beschrijving van de kalibratiemethode, de doelfunctie(s) of modelprestatie indices en de convergentiecriteria.

Aandachtspunt: Een parameter die in de huidige toestand van het grondwatersysteem weinig belangrijk is, kan in een toekomstige toestand plots wel belangrijk worden. De huidige toestand laat niet altijd toe bepaalde parameters goed te kalibreren. Zo is bijvoorbeeld de intreeweerstand van een waterloop naar het grondwater bij een klein stijghoogteverschil niet doorslaggevend. Er is immers weinig interactie tussen beide waardoor de intreeweerstand moeilijk is te kalibreren. Wanneer de gradiënt in een toekomstig scenario toeneemt (vb. door een nieuwe grondwaterwinning), wordt de intreeweerstand plots wel erg belangrijk en weegt deze sterk door in de nauwkeurigheid van de modelberekening. Een pompproef kan hierbij extra informatie leveren.

1.3.4.1 Beoordeling van de kalibratie

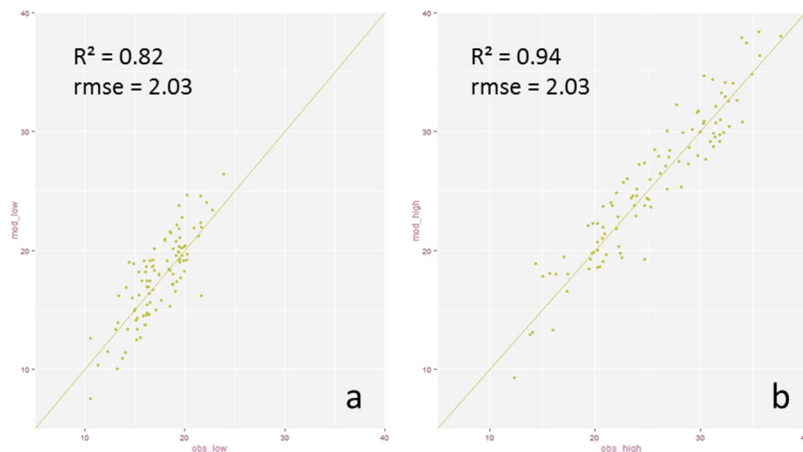
Er zijn verschillende maten voor de 'goodness of fit' van een modelkalibratie. Het is moeilijk een vast criterium op te leggen dat minimaal gehaald dient te worden. Men kan wel verwachten dat een nieuw grondwatermodel minstens even goed scoort dan een voorgaande modellering in hetzelfde gebied.

Naast correlatiematen (vb. R^2) is het noodzakelijk ook de absolute fout te analyseren. Vooral de fout op de voorspelde diepte van de watertafel (cm) is van cruciaal belang om de gevolgen van modelfouten voor latere toepassingen goed te kunnen inschatten. Die toepassingen situeren zich immers in het evalueren van effecten van peilbeheer op potenties voor natuur. Enkele maten voor het vergelijken van gemodelleerde stijghoogten en fluxen met gemeten waarden:

- RMS = root mean square error
- sRMS = scaled root mean square error.
- MSR = mean sum of (absolute) residuals
- sMSR = scaled mean sum of residuals

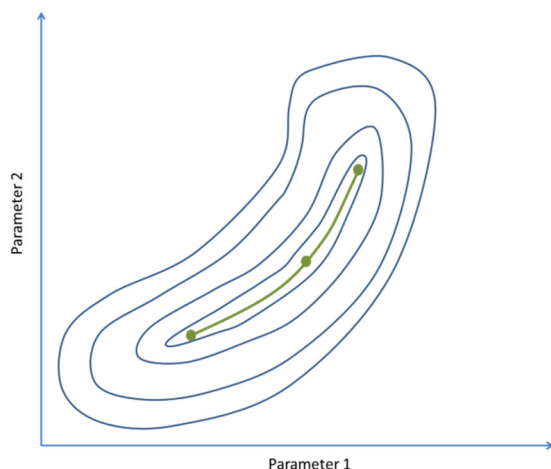
Aandachtspunt: de gemiddelde fout (mean error) geeft een idee over de globale 'bias' van het model, maar is geen maat voor de 'goodness of fit'. De gemiddelde absolute fout is wel bruikbaar.

Aandachtspunt: De correlatie (R^2) van de absolute stijghoogte (vb. in mTAW) tussen de gemeten en de berekende waarden is geen geschikte maat voor de kwaliteit van een grondwatermodel. De grondwaterstand wordt immers sterk bepaald door het reliëf. Dede hoogteligging van oppervlaktewater en het topografisch oppervlak zijn belangrijke randvoorwaarden. De R^2 is daardoor automatisch hoog in regio's met grotere topografische verschillen. In vlakke gebieden leveren dezelfde absolute afwijkingen een veel lagere R^2 (Figuur 11).



Figuur 11: Scatterplot observed versus modelled voor een gebied met beperkte topografische verschillen (a) en een gebied met grotere topografische verschillen (b). De RSME waarde is voor beide gebieden dezelfde, maar R^2 is in b is veel hoger dan in a.

De doelfunctie bij kalibratie heeft vaak geen eenduidig minimum. Verschillende combinaties van parameterwaarden leiden tot eenzelfde waarde voor de doelfunctie wat de vorm aanneemt van een langgerekte gekromde vallei (Figuur 12). Vaak komt dit doordat het grondwatermodel reageert op de verhouding tussen twee parameters, die niet afzonderlijk geïdentificeerd kunnen worden (vb. transmissiviteit en de bergingscoëfficiënt). De metingen leveren informatie over de ratio tussen beide, i.e. de diffusiviteit, maar niet over de parameters afzonderlijk. Om elke parameter afzonderlijk te kennen zijn metingen nodig op een moment dat elk van beide parameters bepalend is voor de modeloutput. Wanneer dit probleem niet kan worden verholpen kan deze modelonzekerheid worden meegenomen door meerdere modellen met verschillende parameterwaarden te weerhouden.



Figuur 12: Doelfunctie voor optimalisatie van twee parameters bij een niet-uniek probleem. De optimale waarde van de doelfunctie ligt niet in één punt. Meerdere combinaties van beide parameters leveren dezelfde waarde voor de doelfunctie (groene lijn).

1.3.5 Voorspelling en scenario's

Bijkomende controle bij het doorrekenen van scenario's:

- Controle of het grondwater niet zakt tot onder de diepte van de filter.
- De gemodelleerde extractie gelijk is aan de opgelegde extractie of de extractie in de vergunningsaanvraag
- De gemodelleerde stijghoogte in de put is niet noodzakelijk de reële diepte. In de nabije omgeving van de put zal de gemodelleerde pompkegel vaak afwijken van de reële pompkegel. Er moet rekening gehouden met 'putverlies'. Omwille van fysische belemmeringen zal het peil in de put vaak lager zijn dan wat op basis van de hydrogeologische eigenschappen kan worden verwacht.

Aandachtspunt: Maatregelen kunnen een effect hebben op bepaalde parameters. Bijvoorbeeld wijziging van de intreeweerstand door baggerwerken of door het omslaan van kwel naar infiltratie of omgekeerd.

Aandachtspunt: De finaal gemodelleerde volumes bij een grondwaterwinning zijn niet noodzakelijk gelijk aan de initieel opgelegde extractievolumes. Het is belangrijk dit te verifiëren en na te gaan hoe het model omgaat met de verschillende situaties.

1.3.6 Rapportage

De rapportage omvat een tekstuele beschrijving van het modelleringsproces en de digitale informatie over de modellering. Het doelpubliek bestaat enerzijds uit experts die een technische evaluatie van het modelleringsproces moeten maken en anderzijds uit niet-experts die uitsluitend de resultaten en de conclusies moeten begrijpen. Voor de eerste groep moet de rapportage voldoende gedetailleerd zijn om op basis van de tekst, cijfers en figuren het model en het modelleringsproces te begrijpen. Voor de tweede groep is een niet-technisch en samenvattend hoofdstuk wenselijk.

De structuur van de rapportage wordt best logisch en grotendeels chronologisch opgebouwd volgens de stappen in het modelleringsproces, aangevuld met enkele extra hoofdstukken: conclusies en aanbevelingen, referenties, een bijlage met verwijzing naar de digitale bestanden, model gebruik en beperkingen (een specifiek hoofdstuk om de beperkingen van het model aan te geven).

Bij grotere grondwatermodelleringsprojecten wordt bij voorkeur minstens driemaal tussentijds gerapporteerd en teruggekoppeld met de belanghebbenden:

- na het opbouwen van het conceptueel model
- na de uitwerking van het grondwatermodel
- na de berekening van de scenario's.

De digitale bestanden worden bij voorkeur aangeleverd in een formaat dat onafhankelijk is van een specifieke gebruikersinterface of softwarepakket. In de tekstuele beschrijving (of in een bijlage) wordt de locatie en de inhoud van de digitale bestanden duidelijk toegelicht.

1.3.7 Een checklist voor de rapportage

Tabel 2: Checklist voor de rapportage van een grondwatermodel. De lijst overloopt de belangrijkste punten uit de voorgaande paragrafen.

Onderdeel	Extra
1. Planning & doelstelling	
1.1. Formulering van de doelstellingen van het project	
1.2. Formulering van de doelstellingen van het grondwatermodel. Beschrijving hoe de resultaten van model worden verwerkt en gebruikt in het vervolg van het project	Dit deel omvat o.a. een beschrijving hoe de modelresultaten worden gebruikt voor de ecohydrologische aftoetsing.
1.3. Bespreking van de vereiste nauwkeurigheid van het model.	Beschrijving hoe de nauwkeurigheid wordt gemeten en een motivatie waarom die nauwkeurigheid vereist is.
1.4 Bespreking van de grenzen waarbinnen het model kan worden toegepast	1e. Schaal, geografisch begrenzing binnen het modelgebied, aard van de scenario's, ...
1.5 Eenduidige omschrijving van de verschillende door te rekenen scenario's	

2	Systeemanalyse en conceptueel model	
2.4	Bespreking van de geconsulteerde externe databronnen en literatuur	
2.5	Beschrijving van de hydrogeologische opbouw in het studiegebied	Hydrostratigraphy, reikwijdte, diepte, dikte, afgesloten, niet-afgesloten, breuken, doorlatendheden, ...
2.6	Beschrijving van alle interacties met het grondwater	Infiltratie, evapotranspiratie, interactie met rivieren, beken en meren, grondwaterwinning, ...
2.7	Bespreking van de stijghoogtemetingen	
2.8	Bespreking van aan- en afvoer	Base flow, discharge, ...
2.9	Onzekerheidsanalyse	Aandacht voor onzekerheden op de metingen
2.10	Beschrijving van het conceptueel model	Kaart, verticale doorsneden, ...
2.11	Consistentie tussen objectieven en conceptueel model	Alle relevante hydrologische processen? verantwoording voor vereenvoudigingen? alternatieve conceptuele modellen?
3	Ontwerp en uitwerking	
3.1	Consistentie tussen het rekenmodel en het conceptueel model	
3.2	Keuze van de modeltechniek en software	Zijn modeltechniek en software geschikt en betrouwbaar? Wordt de software beschreven in de literatuur? 1D, 2D of 3D?
3.3	Reikwijdte van het modelgebied en horizontale discretisatie	Voldoende grootte reikwijdte. , lateraal. Horizontale en verticale discretisatie.
3.4	Verticale indeling van de aquifers en aquitards.	Indeling van de hydrogeologische lagen in één of meerdere modellagen.
3.5	Steady state of transient.	Indeling tijdsstappen, stress periodes
3.6	Keuze randvoorwaarden	Keuze van de modelrandvoorwaarden in overeenstemming met het conceptueel model? Garantie dat ze geen effect hebben op de modelresultaten? Beschrijving van de keuzes en implementatie van de laterale randvoorwaarden
3.7	Infiltratie	Diffuus of spatiaal. Tijdsafhankelijk of gemiddeld
3.8	Beschrijving van het topsysteem (interactie grondwater/oppervlaktewater)	Beschrijving hoe kwel, seepage worden gemodelleerd. Interactie met het oppervlaktewatersysteem.

	Koppeling. Dynamische of statische koppeling
3.8 Initiële condities	Beschrijving van de initiële condities. Effect van initiële condities op de modelresultaten.
3.9 Numerieke resultaten	Beschrijving van de solver, convergentiecriteria en numerieke precisie
4 Kalibratie en sensitiviteitsanalyse	
4.1 Beschrijving van de data gebruikt voor de kalibratie	Stijghoogtemetingen, debietsmetingen, ...
4.2 Beschrijving van de kalibratiemethode	Manueel, (half)geautomatiseerd, te kalibreren parameters, kalibratieranges, optimalisatiefunctie en convergentiecriteria
4.3 Sensitiviteitsanalyse	Sensitiviteit t.a.v. één of meerdere parameters, randvoorwaarden, initiële condities, stress
4.4 Presentatie van de kalibratieresultaten	Figuren met geschikte schaal, relatieve en absolute waarden, ruimtelijke en temporele afwijkingen, Kalibratiestatistieken, RMSE, ...
4.5 Interpretatie van de kalibratieresultaten	Zijn de bekomen parameters aannemelijk,
4.6 Waterbalans	Zijn de waterbalansen realistisch? Voor het hele gebied als voor deelgebieden. Uitwisseling met oppervlaktewatersysteem. Kwel, infiltratie, ...
4.7 Modelverificatie	Presentatie van de goodness of fit met onafhankelijke metingen, niet gebruikt in de kalibratie
5 Predicties	
5.1 Informatie over de onzekerheden	
5.2 Beschrijving van de implementatie van de scenario's in het model 5.3 Blijven de ingrepen binnen ranges waarvoor het model werd gecalibreerd?	Vb. gewijzigde winningen. Aandacht voor reductie in betrouwbaarheid van het model
5.4 Massabalans van de predicties	Zijn de massabalansen realistisch en in overeenstemming met de assumpties? Winningen, vergelijking van seepage naar rivieren en rivierdebiet, controle op anomalieën in de fluxen in de randvoorwaarden
6 Onzekerheid	

6.1 Beschrijving (kwantitatief of kwalitatief) van de onzekerheid op de predicties	Beschrijving van de methodologie om onzekerheid in te schatten. Figuren en tabellen i.v.m. onzekerheid
6.2 Bespreking van de belangrijkste bronnen van onzekerheid	Onzekerheid op de metingen, modelonzekerheid, ...

2. Afkortingen en begrippen

a. Afkortingen

ANB = Agentschap voor Natuur en Bos
DHM = Digitaal hoogtemodel
DOV = Databank Ondergrond Vlaanderen.
KRW = (Europese) Kaderrichtlijn Water
MER = Milieu-effect rapport
VLAREM = Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunning
VMM = Vlaamse Milieumaatschappij
SBZ = Speciale Beschermingszone

b. Begrippen

Begrippen zoals in de tekst worden gebruikt.

** = verklaring van het begrip overgenomen uit de verklarende hydrologische woordenlijst (Hooghart, 1986).*

Afgesloten watervoerende laag (confined aquifer): Watervoerende laag die aan boven- en onderzijde begrensd wordt door ondoorlatende lagen.*

Afvoer (discharge): Afvoer van een debiet (Q) uit een gebied.*

Bemaling van grondwater: Het oppompen en afvoeren van overtollig grondwater. Meestal om het grondwaterpeil onder een bepaald niveau te houden.

Bergingscoëfficiënt (storage coefficient / storativity) (S) (-): De hoeveelheid water dat vrijkomt bij een eenheid verlaging van de stijghoogte of watertafel. De bergingscoëfficiënt is een maat voor de hoeveelheid water die een aquifer op een locatie kan leveren, zonder dat er grondwater van elders wordt aangevoerd. Voor niet al te diepe aquifers is de bergingscoëfficiënt de som van de **bergingscoëfficiënt nabij de watertafel** en de **specifieke elastische berging** * dikte van de aquifer. ($S = S_y + S_s * D$). De bergingscoëfficiënt nabij de watertafel is veel groter dan de specifieke elastische bergingscoëfficiënt. Voor een afgesloten aquifer is $S = S_s * D$, voor een niet-afgesloten aquifer is $S = S_y$.

Bergingscoëfficiënt nabij de watertafel (specific yield) (S_y) (-): De ratio van het volume water dat uit een volume van een aquifer vrijkomt wanneer de aquifer wordt gedraineerd. De Bergingscoëfficiënt nabij de watertafel is kleiner of gelijk aan de porositeit. De waarde varieert typisch tussen 0.3 (zand) en 0.05 (klei).

Databank Ondergrond Vlaanderen: De Databank Ondergrond Vlaanderen is een publiek raadpleegbare geografische databank over de ondergrond in Vlaanderen met onder andere grondwatergegevens (meetnetten, vergunde winningen,...). DOV is een samenwerkingsverband tussen het departement Leefmilieu, Natuur en Energie, het departement Mobiliteit en Openbare Werken en de VMM

Diffusiviteit:

Discretisatie: het ombouwen van een continu model (in ruimte en tijd) naar een model dat het systeem beschrijft in discrete stappen in ruimte en tijd. Numerieke modellen vereisen een discretisatie.

Doorlatendheid (k): een maat voor het vermogen om grondwater door te laten* (m/d).

Dynamische standplaatsvariabelen (GxG's): gemiddeld hoogste grondwaterstand (**GHG**): het gemiddelde van de drie hoogste grondwaterstanden in de winterperiode (1 oktober tot 1 april); gemiddeld laagste grondwaterstand (**GLG**): het gemiddelde van de drie laagste grondwaterstanden in de zomerperiode (1 april tot 1 oktober); gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (**GVG**): de gemiddelde grondwaterstand aan het begin van het groeiseizoen: het gemiddelde van drie metingen rond 1 april. De vereiste duur van de metingen is 5 tot 8 jaar, afhankelijk van de variabiliteit van de grondwaterstand.

Eindige differentie methode: numerieke oplossingsmethode. De continue differentiaalvergelijkingen worden omgezet naar discrete differentievergelijkingen met behulp van een raster met rechthoekige cellen

Eindige verschillen methode: numerieke oplossingsmethode. De continue differentiaalvergelijkingen worden omgezet naar discrete differentievergelijkingen met behulp van discrete elementen geordend in een netwerk van knooppunten.

Focusgebied: de zone van het studiegebied waarvoor de effecten van een ingreep worden afgetoetst. Bijvoorbeeld de zone met voorkomen van een grondwaterafhankelijke vegetatie.

Freatisch grondwater: Het eerste grondwater dat men tegenkomt wanneer men gaat graven, is freatisch. Het is grondwater in relatief goed-doorlatende grond (bijvoorbeeld een zandlaag) bovenop een eerste slecht doorlatende bodemlaag (bijvoorbeeld klei).

Freatisch watervoerende laag:

Grondwater: Al het water dat zich onder het bodemoppervlak in de verzadigde zone bevindt, er al of niet tijdelijk wordt opgeslagen en dat in direct contact staat met de bodem of ondergrond. Men onderscheidt freatisch grondwater en water dat zich in de diepere grondwaterlagen bevindt.

Grondwaterlichaam:

Grondwaterstand: de hoogte t.o.v. een referentieniveau (bv. mTAW) van een punt waar het grondwater een drukhoogte gelijk aan nul heeft*. Dit komt overeen met de hoogte van het water in een uitgegraven put of in een peilbuis met een filter tot net in de verzadigde zone.

Grondwatersysteem met 'stress'

Grondwatervoeding: aanvulling van het grondwater. In de leidraad gaat het steeds over de voeding van grondwater uit neerslag via infiltratie en percolatie (m/dag).

Grondwaterwinning

Invloedssfeer grondwaterwinning

Kwel (seepage): het uittreden van grondwater aan het oppervlak, in sloten of drains of via capillaire opstijging.

NACE: NACE verwijst naar de verschillende nomenclaturen van economische activiteiten. Op Belgisch niveau is dit NACE-bel

Overfitting

Piëzometer: een peilbuis met een korte filter zodat de stijghoogte op een bepaalde diepte wordt gemeten.

Pompkegel: kegelvormige verlaging van de grondwaterspiegel of het stijghoogteoppervlak veroorzaakt door een onttrekking van grondwater uit een of meerdere putten.*

Porositeit: De ratio van het volume aan poriën ten aanzien van het totaal volume van de grond (-)

Putverlies (well loss): het extra verlies van stijghoogte in een pompput als gevolg van beperkingen in de stroming rondom de pompput.

Speciale Beschermingszone (SBZ): onderdeel van het Natura2000 netwerk. Elk SBZ is nog verder opgedeeld in deelgebieden. SBZ-H staat voor speciale beschermingszone voor de Habitatrichtlijn, SBZ-V voor speciale beschermingszone voor de Vogelrichtlijn.

Specifieke (elastische) bergingscoëfficiënt (specific storage) (S_s) (m^2/m^3): De hoeveelheid water dat uit een volume eenheid van een aquifer vrijkomt bij een eenheid verlaging van de stijghoogte terwijl de aquifer volledig verzadigd blijft. De vrijgekomen hoeveelheid water is louter afkomstig van het drukverschil. De specifieke elastische berging is enkele ordegrottes kleiner dan de bergingscoëfficiënt nabij de watertafel.

Standplaats(niveau)

Stijghoogte: De som van de drukhoogte en plaatshoogte*. Het is de hoogte die wordt gemeten met een piëzometer. De stijghoogte verschilt naargelang de diepte en de lengte van de filter.

Studiegebied: Het gehele gebied waarover in de studie informatie wordt verzameld.

Tijdsafhankelijk model (of transient): model waarbij de tijd een variabele is. De toestand van het systeem wordt voor elke tijdstap berekend.

Tijdsonafhankelijke model (of steady-state): Een model waar de tijd geen variabele is. Een tijdsonafhankelijk model berekent enkel grondwatersystemen in (dynamisch) evenwicht.

Transmissiviteit (T): Het vermogen van een watervoerend pakket om water door te laten.* De transmissiviteit wordt berekend als de doorlatendheid (k) * Dikte (D) (m^2/dag).

Verlaging (drawdown): Daling van de stijghoogte. Meestal als gevolg van een waterwinning, verandering in waterstanden van het oppervlaktewater of vermindering van infiltratie.

Volkomen / onvolkomen put (fully / partially penetrating well): Een volkomen put is een verticale put waarvan de filter doorloopt over de gehele dikte van de watervoerende laag. Bij een onvolkomen put is de filter beperkt tot een deel van de watervoerende laag*.

Waterscheiding: grens tussen twee stroomgebieden*

Watervoerende laag:

Referenties

- Acreman M.C., Miller F. (2004). Impact Assessment on Wetlands: Focus on Hydrological and Hydrogeological Issues. R&D Technical Report W6-091/TR1. Wallingford, UK: CEH - Centre for Ecology and Hydrology 139 p.
- Acreman M.C., Miller F. (2006). Hydrological impact assessment of wetlands. International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS). Alicante, Spain. p 225-255.
- Anoniem. (2006). Grondwaterbeheer in Vlaanderen: het onzichtbare water doorgrond. Depotnummer: D/2006/6871/034. Aalst: Vlaamse Milieumaatschappij (VMM). 150 p.
- Barnett B., Townley L.R., V. P., Evans R.E., Hunt R.J., Peeters L., Richardson S., Werner A.D., Knapton A., Boronkay A. (2012). Australian groundwater modelling guidelines. Waterlines Report Series No. 82. Canberra, Australia: National Water Commission.
- Batelaan O., Meyus Y., De Smedt F. (2007). De grondwatervoeding van Vlaanderen. Congres watersysteemkennis 2006/2007: recente ontwikkelingen in het grondwateronderzoek in Vlaanderen Water: Tijdschrift over Integraal Waterbeleid 28:64-71.
- Boak R., Bellis L., Low R., Mitchell R., Hayes P., McKelvey P., Neale S. (2007). Hydrogeological impact appraisal for dewatering abstractions. Science Report – SC040020/SR1. Bristol, UK: Environment Agency.
- Bot B. (2011). Grondwaterzakboekje. Rotterdam, NL: Bot Raadgevend Ingenieur.
- Bronders J., Patyn J., Van Keer I., Desmet N., Vos J., Peelaerts W., Decorte L., Gobin A. (2013). Voortoets, Module 3 - Inhoudelijke uitwerking van module 3 in de online toepassing van de voortoets: het bepalen van de reikwijdte van effecten voor de indirecte effectgroepen - Thema grondwater. Studie uitgevoerd in opdracht van: ANB 2013/RMA/R/120. Mol: VITO. 86 p.
- De Bie E., Herr C., Huybrechts W. (2011). Voorstudie naar de opmaak van ecologische waterkwantiteitsdoelstellingen voor de Speciale Beschermingszones (SBZ-H). INBO.R.2011.7. Studie in opdracht van het Agentschap voor Natuur en Bos (ANB/GVH/2009/1). Brussel: INBO - Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek.
- De Smedt F. (2009). Groundwater hydrology part 2 - syllabus. Brussel: VUB - Vrije Universiteit Brussel. 48 p.
- Driscoll F.G. (1986). Groundwater and wells. Minnesota: Johnson Filtration Systems.
- Hooghart J.C. (1986). Verklarende hydrologische woordenlijst. Gespreksgroep Hydrologische Terminologie. Rapporten en nota's 16. 's Gravenhage: Commissie voor hydrologisch Onderzoek TNO. 127 p.
- Huisman L. (1972). Groundwater recovery. London: MacMillan Publishers. 131 p.
- Kemmers R.H., Gieske J.M.J., Veen P., Zonneveld L.M.L. (1995). Standaard meetprotocol verdroging; voorlopige richtlijnen voor monitoring van anti-verdrogingsprojecten. NOV-Rapport 15.1. Wageningen: SC-DLO, RIZA.
- Lebbe L. (1999). Hydraulic parameter estimation: generalized interpretation method for single and multiple pumping tests. Berlin: Springer Verlag. 359 p.
- Lebbe L., Vandenbohede A. (2004). Ontwikkeling van een lokaal axi-symmetrisch model op basis van de HCOV kartering ter ondersteuning van de adviesverlening voor grondwaterwinningen. Studie in opdracht van AMINAL, afdeling water. Gent: UGent. 23 p.
- Srivastava R., Guzman-Guzman A. (1998). Practical approximations of the well function. Ground Water 36(5):844-848.
- STOWA-RIZA, van Waveren R.H., Groot S., Scholten H., van Geer F.C., Wösten J.H.M., Koeze R.D., Noort J.J. (1999). Vloeien modelleren in het waterbeheer. Handboek Good Modelling Practice. STOWA rapport 99-05. RIZA rapport 99.036. 157 p.
- Theis C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Transactions American Geophysical Union 16:519-524.
- Van de Broeck S., Heirman S., Van Haecke K., Goessens X., Anthierens A. (2011). Richtlijnenboek MER - water. eindversie revisie v0.7: Departement LNE - afd. Milieu, NATuur- en Energiebeleid, dienst Milieueffectrapportage. 175 p.
- Verruijt A. (1970). Theory of Groundwater Flow. London: Macmillan.
- Wheeler B.D., Gowing D.J.G., Shaw S.C., Mountford J.O., Money R.P. (2004). Ecohydrological Guidelines for Lowland Wetland Plant Communities. (Eds. A.W. Brooks, P.V. Jose and M.I. Whiteman)
- Peterborough, UK: Environment Agency (Anglian Region).
- Willems E., Monseré T., Dierckx J. (2015). Geactualiseerd richtlijnenboek milieueffectrapportage 'Basisrichtlijnen per activiteitengroep – Landbouwdieren'. Brussel: Departement Leefmilieu, Natuur en Energie. Afdeling Milieu-, Natuur- en Energiebeleid. Dienst Mer.

