

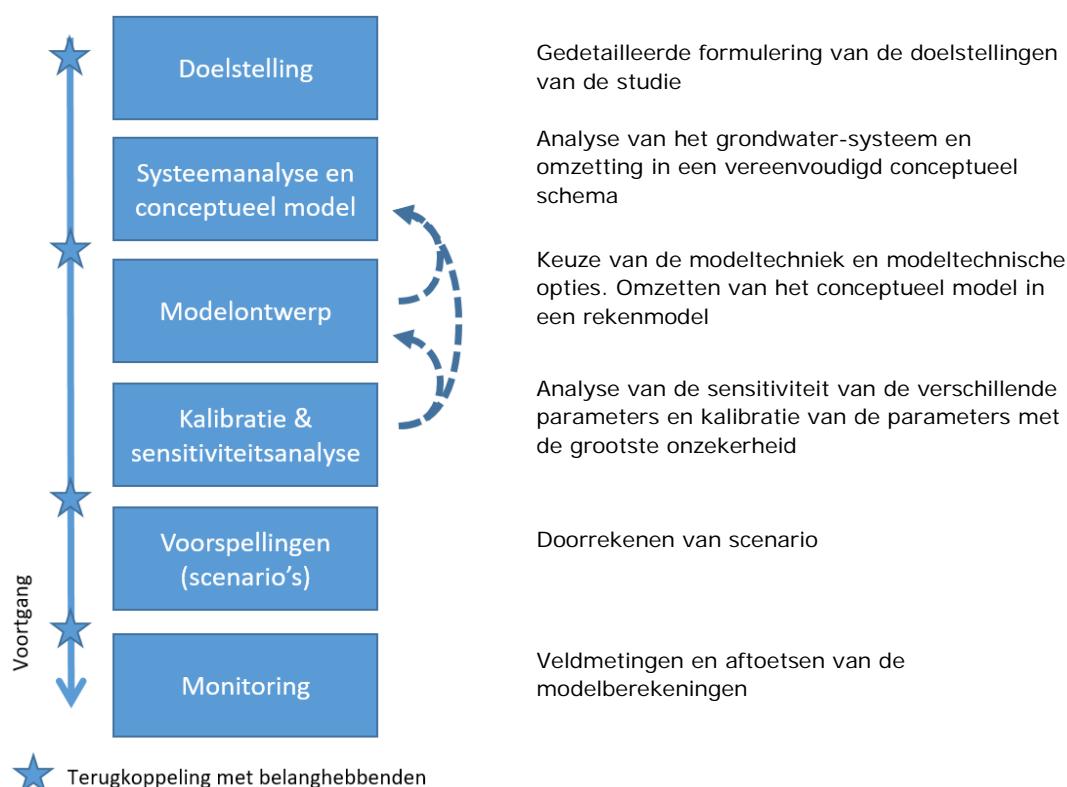
# Bijlage A: Modellerproces

## 1 Structuur

Om onderling vlot over een modellerproject te communiceren is het belangrijk dat alle belanghebbenden, vaak met uiteenlopende achtergrond en invalshoek, een gezamenlijk kader hebben. De verschillende stappen van het modellerproces moeten daarom een duidelijke structuur doorlopen waarbij alle keuzes op een gestructureerde wijze en expliciet in de rapportage worden beschreven, ook al zijn ze soms voor de hand liggend. Enkele studies die dieper ingaan op dit modellerproces zijn o.a. Acreman & Miller, 2004; Boak *et al.*, 2007; Refsgaard & Henriksen, 2004.

Elk grondwatermodel, hoe eenvoudig ook, vereist de nodige expertkennis en ervaring. Dit geldt zowel voor wie het grondwatermodel uitwerkt als voor wie de resultaten van de studie beoordeelt en interpreteert.

De indeling en structuur van een modellerproces varieert naargelang het handboek. In figuur 1 staat een eenvoudig voorbeeld met zes stappen. Het proces is niet noodzakelijk lineair. Meestal is terugkoppeling met voorgaande stappen vereist.



Figuur 1: Verschillende stappen van het modellerproces

## 2 Formuleren doelstelling

Van bij de start moet er onder de belanghebbenden eensgezindheid en duidelijkheid zijn over de doelstellingen van de modellering en het voorziene gebruik van de modelresultaten (eerder

beschrijvend of ook voorspellend, de aard en de omvang van de te modellerende ingreep en impact, de verschillende scenario's, ...). Eenzelfde grondwatermodel kan niet zondermeer voor uiteenlopende doeleinden worden ingezet. Een duidelijke omschrijving van de doelstelling helpt de juiste keuzes te maken in de opeenvolgende stappen van het modelleringsproces.

De beschrijving van het voorziene gebruik vereist dat bij de start wordt nagedacht over de gewenste betrouwbaarheid van het model en het gewenste type output. Wanneer in de loop van de studie blijkt dat de vooropgestelde betrouwbaarheid niet haalbaar is, moet worden bijgestuurd.

*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 en nauwkeurigheid van de modelresultaten.*

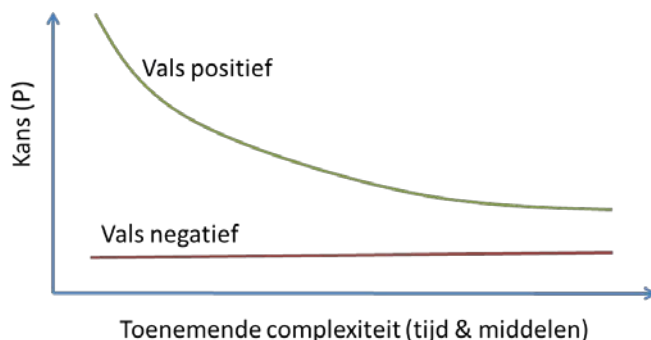
*Aandachtspunt: Relatief kleine verschillen in grondwaterdynamiek kunnen een grote impact hebben op de vegetaties. Het is moeilijk om met een grondwatermodel een voldoende nauwkeurigheid in absolute cijfers te behalen. De relatieve veranderingen ten aanzien van een referentiesituatie zijn vaak minder onzeker en beter geschikt om aan af te toetsen. Wanneer de nauwkeurigheid onvoldoende is, kan ervoor worden gekozen om voor alle assumpties steeds een 'veilige keuze' te maken om zo een model te bekomen voor een 'worst-case' situatie.*

### 3 Van eenvoudig naar complex

Een modellering is een sterke vereenvoudiging en schematisering van de realiteit. Er bestaat geen 'beste' grondwatermodel voor een bepaalde vraagstelling. Meerdere benaderingen zijn valabel, elk met voor- en nadelen. Bij een passende beoordeling staat niet noodzakelijk de kennis en inzicht van het grondwatersysteem voorop, maar wel een goede inschatting van de maximaal te verwachten impact. Bij de interpretatie van de resultaten moet rekening gehouden worden met de onzekerheden van het model.

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 complexiteit toe te voegen die strikt vereist is voor de studie. Zo wordt een voldoende niveau van betrouwbaarheid bekomen met een zo eenvoudig mogelijk, maar geschikt grondwatermodel.

Door voor alle onzekere parameters een 'worst case' waarde aan te nemen blijft het risico op een vals negatief resultaat beperkt. De kans op een vals positief resultaat is daardoor allicht hoog. Een meer uitgebreide en complexe modellering kan de kans op vals positieve resultaten verminderen (zonder een significante verhoging van de vals negatieven), maar dit vereist extra tijd en middelen (figuur 2).



Figuur 1: Schematische voorstelling van de worst-case benadering bij toenemende complexiteit

## 4 Modeltechnische opties

Er is een breed gamma aan grondwatermodelleringstechnieken beschikbaar. Het is belangrijk dat de modeltechniek aangepast is aan de doelstellingen en de hydrogeologische context. De modeltechniek kunnen we opdelen op basis van de dimensie van de modellering (1D, 2D, 3D) en de oplossingsmethode (analytisch of numeriek).

### 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, de complexiteit en de interpretatie van de modelresultaten.

- 1D modellering worden veel gebruikt voor de berekening van de verticale stroming in de onverzadigde zone.
- 2D modellering in een verticaal vlak is mogelijk in een uniform stromingsveld met min of meer parallelle stroming (vb. tussen twee kanalen of dwars op een vallei).
- 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 watervoerende lagen (aquifers) die boven en onder worden begrensd door waterremmende lagen (aquitards) waarin de stroming uitsluitend verticaal is. Quasi 3D modellen worden veel gebruikt. Ze kunnen heel uiteenlopende grondwatersystemen nauwkeurig beschrijven.
- 3D modellen beschrijven de grondwaterstroming in alle drie de dimensies. Het is de meest volledige aanpak, maar vereist extra rekenkracht en complexiteit.

### 4.2 Oplossingsmethode

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

- Analytische formules: voor de berekening in een eenvoudig en homogeen grondwatersysteem bestaat een waaier aan analytische formules. De formules zijn eenvoudig uit te rekenen en het aantal vereiste parameters blijft beperkt.
- Analytische elementen: de combinatie (superpositie) van analytische oplossingen laat toe om meer complexe situaties te berekenen. De analytische elementmethode wordt snel complex waardoor meestal geopteerd wordt voor een numeriek model.
- Numeriek – eindige verschillen (finite differences): de eindige elementmethode deelt het studiegebied op in homogene cellen. In elke cel kunnen de variabelen een verschillende waarde aannemen. De methode is geschikt om complexe grondwatersystemen te modelleren.
- 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.

### 4.3 Software

Voor de lijst met softwarepakketten verwijzen we naar de bijlage 3 van het MER Richtlijnenboek – Water (Departement Omgeving, 2021). Het is een uitgebreide lijst met de meest voorkomende softwarepakketten voor grondwatermodellering.

Een softwarepakket dat niet in de bijlage 3 werd opgenomen is het programma MLU (Multi-Layer Unsteady state)<sup>1</sup>. Het programma is relatief eenvoudig en de benadering is geschikt

---

<sup>1</sup> [www.microfem.com/products/MLU](http://www.microfem.com/products/MLU)

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 het ontbreken van een uitgebreid topsysteem.

#### 4.4 Keuze modeltype

Een goed grondwatermodel is zo eenvoudig mogelijk, maar toch geschikt voor de situatie. Hoe groter de invloed van een ingreep op het grondwatersysteem, hoe groter de kwaliteitseisen die aan het grondwatermodel worden opgelegd om als voorspellend instrument te kunnen dienen.

Een grondwatermodel dat de referentiesituatie goed beschrijft zal een beperkte ingreep vrij goed kunnen voorspellen zolang de belangrijkste processen en transfers in dezelfde range blijven. De impact van een ingreep met een grote invloed op het grondwatersysteem zal hetzelfde grondwatermodel veel minder nauwkeurig kunnen berekenen. In dit geval is de robuustheid van het model essentieel. Dit kan worden ondervangen door voor onzekerheden en onbekenden in het model een 'veilige keuze' te maken en een 'worst case' scenario te hanteren. Bij een eenvoudige situaties (bijvoorbeeld: een beperkte en tijdelijke ingreep) kan een eenvoudige analytische formule allicht volstaan. Bij een complexe situatie (bijvoorbeeld: aftoetsen van uiteenlopende scenario's en in rekening brengen van cumulatieve effecten) is allicht een numerieke en tijdsafhankelijke modellering vereist.

De geschikte modelaanpak hangt ook af van de complexiteit van het hydrogeologische systeem. Bij een ingreep met een beperkte impact op de waterhuishouding is het goed mogelijk dat aan de assumpties voor analytische berekening voldaan is. Bij een ingreep met een grote impact in een groot gebied is allicht een uitgebreid conceptueel schema vereist waarvoor dan best een numeriek grondwatermodel wordt ingezet.

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

- Verlaging aftoetsen aan een **drempelwaarde** ( $< x$  cm). De verlaging mag dan niet groter zijn dan de vooropgestelde 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.

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

- Omvang van de ingreep.
- Wordt het grondwater gewonnen uit een freatische of een afgesloten watervoerende laag?
- De wijze van aftoetsen van de verlaging of verhoging aan bepaalde normen: volstaat aftoetsen aan een drempelwaarde of wordt er getoetst aan GxG waarden.
- De gelaagdheid en complexiteit van het hydrogeologische systeem.
- Aard en complexiteit van de door te rekenen scenario's.

In schema 1 van het advies staat een schema dat met bovenstaande criteria aangeeft of in het kader van een passende beoordeling een numeriek grondwatermodel vereist of gewenst is. Het schema werd grotendeels overgenomen van de schema's in Richtlijnen bemaling bouwputten (VMM, 2019) en Richtlijnen lijnbemalingen (AGT, 2020) met enkele beperkte aanpassingen, specifiek voor passende beoordeling.

Bijlage B bespreekt aandachtspunten voor het gebruik van een aantal analytische formules. In bijlage C wordt dieper ingegaan op de aandachtspunten voor het gebruik van numerieke grondwatermodellering bij een passende beoordeling.

# Bijlage B: Gebruik van analytische formules

## 1 Inleiding

Analytische formules zijn vrij eenvoudig en snel toe te passen. Daarom worden ze vaak gebruikt voor kleinere ingrepen en eenvoudige situaties (bv. invloed van een tijdelijke en kleine bouwput). In referentiewerken zijn formules terug te vinden voor uiteenlopende situaties, o.a. in Driscoll (1986), Marsily (1986) en Bruggeman (1999), het grondwaterzakboekje (Bot, 2011) en op websites, waaronder [www.grondwaterformules.nl](http://www.grondwaterformules.nl).

Enkele veelgebruikte formules voor freatische watervoerende lagen zijn de formule van Dupuit (Dupuit, 1857), formule van Theis (Theis, 1935), formule van Edelman (Edelman, 1972) en de formule van Verruijt (Verruijt, 1970). De theoretische afleidingen van de formules zijn o.a. terug te vinden in Lebbe (1999) en Verruijt (1970). In het open source python package Anaflow<sup>2</sup> zijn voor een aantal formules ingebouwde functies uitgewerkt. Het schema (figuur 2) in de toelichting van het advies geeft voor een aantal situaties een geschikte formule weer.

*Aandachtspunt: analytische formules worden vaak gebruikt wanneer er weinig informatie beschikbaar is over de hydrogeologische kenmerken van het studiegebied. De waarden van de parameters moet worden gekozen vanuit een 'worst case' benadering.*

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

*Aandachtspunt: De meeste analytische formules gaan uit van een horizontale grondwaterstroming naar een volkomen put (een filter over de volledige dikte van de watervoerende laag). Voor een onvolkomen put is een correctie mogelijk (bijvoorbeeld Driscoll, 1986, p.250). Het effect is slechts relevant voor relatief korte afstanden. Vanaf een afstand meer dan 2x de diepte van de winningsput is het verschil tussen een volkomen en een onvolkomen put meestal te verwaarlozen.*

## 2 Enkele analytische formules

### 2.1 Formule van Dupuit

De verlaging bij een puntonttrekking uit een freatische watervoerende laag kan worden berekend met de formule van Dupuit (1857). De formule veronderstelt een uniforme dikte van een aquifer zonder helling (figuur 3). In de onderstaande vergelijking is de formule van Dupuit uitgewerkt zodat de verlaging ( $s$ ), op een bepaalde afstand ( $r$ ) wordt bekomen (Bronders *et al.*, 2013). Voor andere vormen van de formule (vb. om het debiet,  $Q$ , te berekenen) verwijzen we naar de Richtlijnen bemaling (VMM, 2019).

$$s(r) = D - \sqrt{D^2 - \left(\frac{Q}{\pi Kh}\right) \ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

---

<sup>2</sup> <https://github.com/GeoStat-Framework/AnaFlow>

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

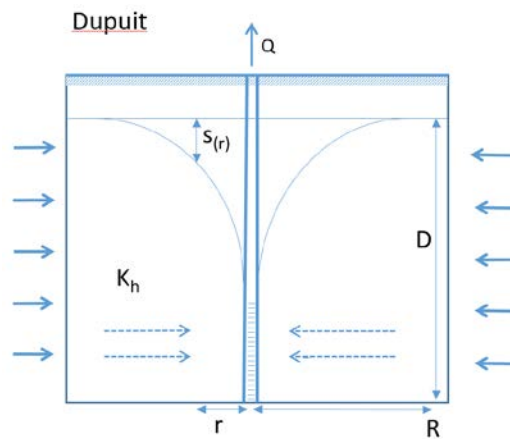
r = afstand tot de onttrekking (m)

R = invloedstraal, de afstand (m) waarop de onttrekking geen noemenswaardige verlaging meer veroorzaakt.

Q = grootte van de onttrekking ( $m^3/d$ )

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

$K_h$  = (horizontale) doorlatendheid (m/d)



Figuur 2: Schematische voorstelling van de modelconcept van de formule van Dupuit (1857).

De formule van Dupuit wordt gebruikt in het Excel rekeninstrument voor de bemalingen van een bouwput. Dit rekeninstrument werd door de Vlaamse Milieumaatschappij ontwikkeld (VMM, 2020). Met het rekeninstrument kan de verlaging worden berekend voor een gekozen afstand. Het Excel bestand is beschikbaar op de website van de Vlaamse Milieumaatschappij.

## 2.2 Formule van Verruijt

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

Q = grootte van de onttrekking (m<sup>3</sup>/d)

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

K<sub>h</sub> = (horizontale) doorlatendheid (m/d)

N = grondwateraanvulling uit netto neerslag (m/d)

*Aandachtspunt: Voor de grondwatervoeding moet een conservatieve (lage) waarde worden gehanteerd. Batelaan et al. (2007) schat de grondwatervoeding in Vlaanderen gemiddeld op 222 mm/jaar met een standaardafwijking van 83 mm/jaar). Voor een vrij droog jaar met een retourperiode van 10 jaar wordt de grondwatervoeding dan op 115 mm/jaar geschat. Dit is echter zonder rekening te houden met de lokale verschillen in grondwatervoeding.*

## 2.3 Formule van Theis

De formule van Theis (Theis, 1935) is geschikt voor tijdelijke onttrekkingen en slechts enkele dagen tot enkele maanden 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 in de tijd en strekt zich steeds verder uit (figuur 4). Voor langdurige onttrekkingen 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 << D).

De formule van Theis is goed beschreven in het grondwaterzakboekje (Bot, 2011) en op de website [www.grondwaterformules.nl](http://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(r, t) = verlaging (m) t.o.v. de uitgangssituatie op afstand r en tijdstip t

r = afstand tot de onttrekking (m)

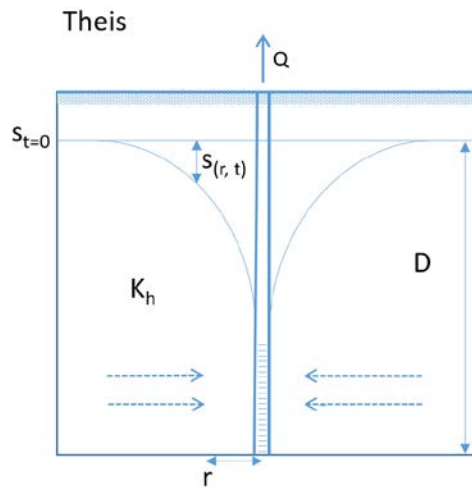
Q = onttrekking (m<sup>3</sup>/d)

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

K<sub>h</sub> = (horizontale) doorlatendheid (m/d)

S = bergingscoëfficiënt (-)

t = tijd (d)



Figuur 3: Tijdsafhankelijke onttrekking (Theis). Voorwaarde  $s \ll D$

$W(u)$  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.

Formule van Srivastava & Guzman-Guzman (1998):

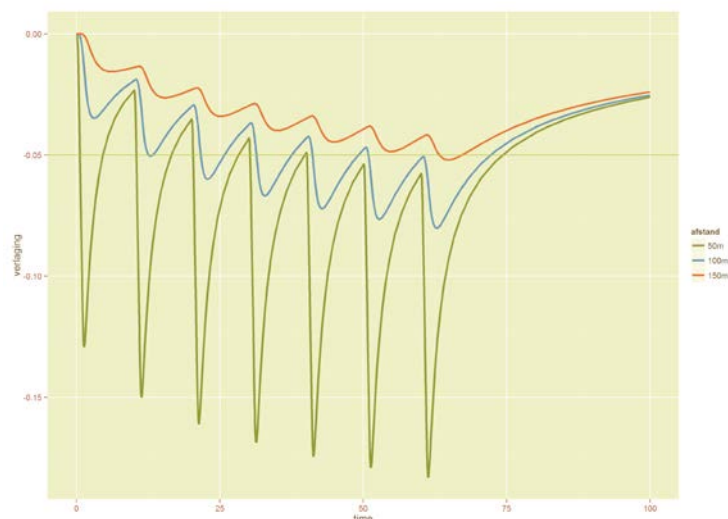
$$\text{voor } u \leq 1: \quad W(u) = \ln\left(\frac{e^{-y}}{u}\right) + 0,9653 u - 0,1690 u^2$$

$$\text{voor } u \geq 1: \quad W(u) = \frac{1}{u} \frac{u + 0,3575}{e^u} \frac{u + 1,280}{u + 1,280}$$

$$y = 0,57721 \dots \text{ de Euler - Mascheroni constante}$$

*Aandachtspunt: Bij een onttrekking die gedurende een korte tijd, maar verschillende keren na elkaar actief is (bijvoorbeeld een beregening), is de pauze van de onttrekking niet altijd voldoende om terug te keren naar de uitgangssituatie (figuur 5). Vanuit een ecohydrologisch perspectief zijn de gecumuleerde effecten 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 en het geheel van alle onttrekkingscycli omvatten.*





Figuur 5: Verlaging van de grondwaterstand door een niet-continue winning op drie afstanden (50 m, 100 m en 150 m) voor een periodieke grondwaterwinning:  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{d}$  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 uitgevoerd met MLU 2,25)

*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 kijken we naar beperkte verlagingen 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,  $Kh \cdot D = 100 \text{ (m/d)}$  en  $S = 0,3$  (-): een verlaging van 5 cm wordt bereikt op 211 m. Met de benaderende formule van Huisman is dit slechts 173 m (82 %). De benaderende formule van Srivastava (1998) is wel voldoende nauwkeurig ([www.grondwaterformules.nl](http://www.grondwaterformules.nl)).

*Aandachtspunt:* De verlaging van een onttrekking op grote afstand zal ook na het stoppen van de onttrekking nog enige tijd doorzetten. Dit effect is relatief beperkt, maar met de formule van Theis onmogelijk te berekenen.

## 2.4 Formule van Edelman

De formule van Edelman kan gebruikt worden om de verandering van het grondwaterpeil te berekenen bij een plotse verlaging van het waterpeil in een waterloop of gracht. De formule is tijdsafhankelijk.

Het concept is weergegeven in figuur 6. Een watervoerende laag strekt zich in de ene richting oneindig uit en in is in de andere richting begrensd is door een rechte rivier. Op tijdstip  $t=0$  is de watervoerende laag volledig in evenwicht (horizontaal). Vanaf  $t > 0$  verandert het peil met waarde  $h_0$ . De formule geeft aan hoe deze verandering zich doorzet vanaf de 'waterloop'.

$$s(r, t) = h_0 \operatorname{erfc} \left( r \sqrt{\frac{S}{4KhDt}} \right)$$

$s(r, t)$  = verandering van de stijghoogte (verlaging of verhoging) (m) t.o.v. de uitgangssituatie op afstand  $r$  en tijdstip  $t$

$r$  = afstand tot de verlaging (m)

$h_0$  = de (plotse) verandering van het waterpeil (m)

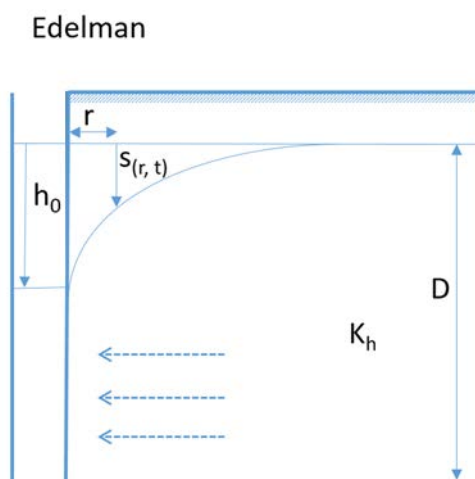
$D$  = dikte van de verzadigde watervoerende laag (m)

$K_h$  = horizontale doorlatendheid (m/d)

$S$  = bergingscoëfficiënt (-)

$t$  = tijd (d)

erfc = de complementaire errorfunctie ( $1 - \text{erf}$ ). Levert een waarde tussen 0 en 1.



*Figuur 6: Schematische situatie voor de formule van Edelman – geval 1, een plotse peilverandering in een waterloop.*

De formule van Edelman wordt gebruikt in het Excel rekeninstrument voor lijnbemalingen. Voor het gebruik van dit instrument werd een handleiding uitgewerkt (AGT, 2021). Het instrument biedt de mogelijkheid om voor een bemaling de verlaging op een gekozen afstand en tijdstip in te schatten.

### 3 Rapportage voor analytische formules

Bij de rapportage voor een passende beoordeling is reproduceerbaarheid essentieel. De gebruikte formules, de bijhorende variabelen en de waarden van de variabelen moeten helder worden weergegeven en gemotiveerd zodat er totale transparantie is over hoe de resultaten werden bekomen. Tabel 1 bevat een checklist van de onderdelen die bij de rapportage van een studie met analytische formules aan bod moeten komen.

*Tabel 1: Checklist voor de rapportage van analytische formules.*

|   | <b>Opmerking</b>  |
|---|---|
| <b>Planning &amp; doelstelling</b>            |   |
| Doelstelling van het project                  | Beschrijving van de situatie en de geplande ingreep   |
| Doelstellingen van de analytische berekening. | Omschrijving hoe het resultaat van de berekening wordt gebruikt in de passende beoordeling. |

|   |  |
|---|--|
| Beschrijving van de verschillende door te rekenen scenario's.                           | Eenduidige definitie en benaming van de scenario's.  |
| <b>Systeemanalyse en conceptueel model</b>  |  |
| Overzicht van de geconsulteerde externe databronnen en literatuur                       |  |
| Beschrijving van de hydrogeologische opbouw in het studiegebied                         | Een eenvoudige beschrijving van de hydrogeologische opbouw en relevante hydrologische processen.   |
| Beschrijving van de interacties en transfers van grond- en oppervlaktewater.            | Infiltratie, evapotranspiratie, interactie met rivieren, beken en meren, grondwaterwinning, ...  |
| Motivatie voor de keuze van de analytische formule                                      | Beknopte beschrijving van het conceptueel model (vb. met een dwarsprofiel) en de assumpties t.a.v. van de hydrogeologische beschrijving. Analyse in welke mate de analytische formule een 'worstcase' benadering is. |
| <b>Uitwerking</b>   |  |
| Een overzicht van de gebruikte waarden voor de variabelen in de formule (in tabelvorm). | Eén regel voor elk scenario. Motivatie voor de keuze van de waarde van de variabelen met bronvermelding 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, Databank Ondergrond Vlaanderen, ...). De waarden worden weergegeven in het SI metriek stelsel<sup>3</sup> met voor alle parameters steeds dezelfde eenheden.

<sup>3</sup> Internationaal stelsel van eenheden

# Bijlage C: numerieke grondwatermodellering voor passende beoordeling

## 1 Inleiding

Het schema van figuur 1 in de toelichting van het advies overloopt meerdere criteria om te bepalen of al dan niet een numerieke grondwatermodellering vereist is. In deze bijlage worden de stappen van het proces voor numerieke modellering overlopen. De tekst is niet exhaustief, maar focust op specifieke aandachtspunten voor een passende beoordeling. In bijlage 6 van de Richtlijnen bemaling (VMM, 2019) gaat men meer concreet in op numerieke modellering met MODFLOW en geeft men een lijst met algemene referentiewerken. Enkele bijkomende referenties zijn:

- Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models (Reilly & Harbaugh, 2004)
- Vloeien modelleren in het waterbeheer. Handboek Good Modelling Practice (STOWA, 1999)
- Australian groundwater modelling guidelines (Barnet *et al.*, 2012)

## 2 Systeemanalyse en conceptueel model

De systeemanalyse omvat de 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 alle beschikbare informatie en databronnen.

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. Naast een beschrijving van de huidige situatie moeten ook de toekomstige situaties, tijdens en na de ingreep, opgenomen worden in de beschrijving. De systeemanalyse moet een voldoende groot gebied omvatten zodat het alle mogelijke invloeden van de ingreep 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 en andere relevante transfers;
- de mogelijke effecten van de ingreep

Met schematische dwarsdoorsnedes kunnen de resultaten van de systeemanalyse worden geïllustreerd, de hydrogeologische opbouw van het studiegebied en de relevante hydrologische processen. Eventueel kunnen meerdere schema's worden uitgewerkt voor lokale situaties en om de verschillen voor en na de ingreep te illustreren.

In de bijlage II van het MER richtlijnenboek - Water (Departement\_Omgeving, 2021) en Richtlijnen bemalingen (VMM, 2019) worden mogelijke databronnen opgesomd. In de volgende paragrafen worden enkele databronnen, specifiek voor ecohydrologische studies overlopen.

### 2.1 Hydrogeologische opbouw

De belangrijkste bron voor de (hydro)geologie in Vlaanderen is de Databank Ondergrond Vlaanderen (DOV)<sup>4</sup>. DOV biedt voor elke HCOV-code (Hydrologische Codering Ondergrond

---

<sup>4</sup> <http://dov.vlaanderen.be>

Vlaanderen) 3D informatie over de basis en de dikte van de lagen. 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 staan 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 (in DOV). Mogelijk is lokale informatie beschikbaar (bijvoorbeeld na een pompproef). Belangrijk is dat keuze voor de waarde van alle variabelen worden gemotiveerd en een referentie naar de bronnen wordt toegevoegd.*

## 2.2 Topografie en oppervlaktewatersysteem

De hoogte van het topografisch oppervlak is cruciaal voor een hydrologisch model dat ondiep grondwater modelleert. Gedetailleerde digitale hoogtemodellen met een spatiale resolutie tot 1 m zijn beschikbaar op Geopunt<sup>5</sup>.

De website Waterinfo<sup>6</sup> geeft toegang tot uitgebreide meetreeksen over neerslag, afvoer van waterlopen en waterstanden.

*Aandachtspunt: Voor een gedetailleerd topsysteem in een grondwatermodel zijn aanpassingen van het DHM vereist (vb. bij bruggen over kanalen en rivieren).*

## 2.3 Grondwaterpeilen

In Vlaanderen zijn er verschillende meetnetten voor de monitoring van grondwaterpeilen. Een groot deel van de peilmetingen zijn online publiek beschikbaar via DOV. Ze worden ingedeeld in verschillende meetnetten, waarvan de volgende het meest relevant zijn:

- **Meetnet 1:** Het primair meetnet van VMM Operationeel Waterbeheer. Het meetnet bevat vooral diepere meetputten. Het wordt gebruikt voor kwantiteitsbeheer, kwalitatieve toestandsmonitoring en operationele monitoring, de meetfrequentie is maandelijks voor peilmetingen en jaarlijks voor kwaliteitsmetingen.
- **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:** Het freatisch grondwatermeetnet van VMM Operationeel Waterbeheer. 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 meetfrequentie is slechts tweemaal per jaar.
- **Meetnet 9:** Metingen INBO, ANB en natuurorganisaties. Hierin zijn voornamelijk meetpunten in natuurgebieden opgenomen met ondiepe filters (maximaal 5 m). De meetpunten bieden inzicht in de lokale grondwaterdynamiek. De lengte van de tijdreeksen varieert van heel kort (de duur van een gebiedsgericht project) tot enkele decennia. De meetfrequentie is tweewekelijks (manueel) tot dagelijks (automatisch).

Er worden nog andere metingen uitgevoerd, maar deze zijn niet altijd onmiddellijk publiek beschikbaar (vb. rechtstreeks van bedrijven of drinkwatermaatschappijen). De aanvraag voor data verloopt via VMM of via de respectievelijke eigenaar/beheerder van de meetpunten.

*Aandachtspunt: voor de kalibratie en validatie van het grondwatermodel is het belangrijk om meetgegevens te nemen die verspreid liggen over het hele modelgebied en op verschillende dieptes en zich niet te beperken tot meetlocaties in het studiegebied.*

---

<sup>5</sup> [www.geopunt.be](http://www.geopunt.be)

<sup>6</sup> [www.waterinfo.be](http://www.waterinfo.be)

## 2.4 Onttrekkingen en andere ingrepen in de omgeving van het projectgebied

Een passende beoordeling moet rekening houden met cumulatieve effecten. Dit betekent o.a. dat de effecten van andere ingrepen 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 de filter is geplaatst en de diepte van de filter zijn online te consulteren via DOV<sup>7</sup>.

*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).*

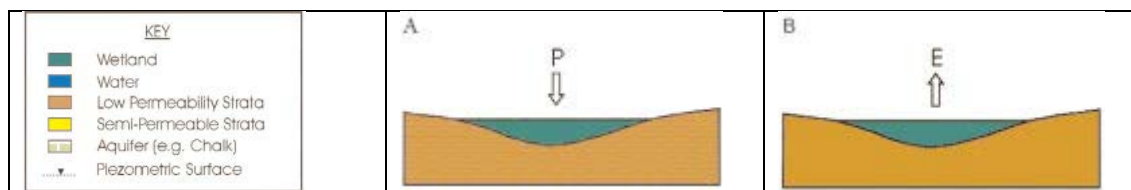
## 2.5 Ecohydrologische kennis en studies over het studiegebied

In het kader van het PAS werd in 2020 voor enkele tientallen grondwaterafhankelijke natuurreservaten een ecologische gebiedsbeschrijving gemaakt (De Becker, 2020). De gebiedsbeschrijvingen zijn een uitgebreide samenvatting van de kennis over de waterhuishouding en de ecohydrologie in deze typegebieden. Ze omvatten zeven verschillende ecohydrologische typesystemen: polders, alluviale valleien met duidelijke kwel, alluviale valleien met weinig kwel, kempische beekdalen, brongebieden, infiltratiegebieden en andere ecohydrologisch wat afwijkende gebieden. De duinen en het Schelde-estuarium (incl. zoetwatergetijdgebieden) worden niet behandeld.

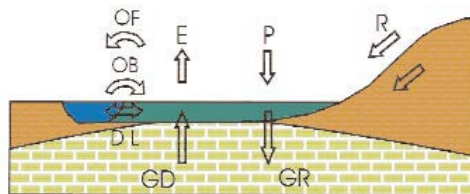
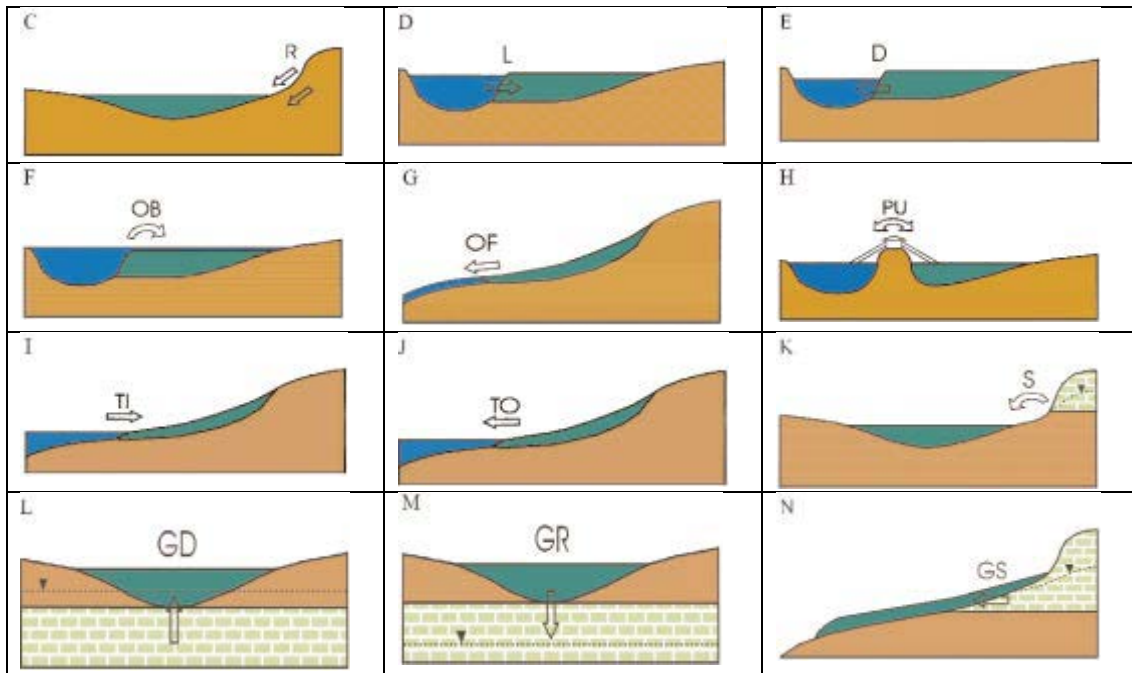
Het INBO maakte in opdracht van ANB een inventarisatie van het merendeel van de ecohydrologische studies in SBZ gebieden (De Bie *et al.*, 2011). Het doel van de inventarisatie is een stand van zaken over de inzichten in het hydrologisch functioneren van de gebieden en de rol van de waterlopen daarin 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.

## 2.6 Conceptueel model

Met de informatie over het grondwatersysteem wordt een conceptueel model van het studiegebied gemaakt. Dit is nog geen rekenmodel, maar een schematische vereenvoudiging van de reële fysische processen. Hier kan de afweging worden gemaakt om bepaalde processen wel of niet op te nemen in het grondwatermodel. Acreman & Miller (2006) geeft een overzicht van veertien verschillende types transfers (figuur 7). Het zijn bouwstenen om het hydrologisch functioneren van een gebied schematisch voor te stellen. 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.



<sup>7</sup> <http://dov.vlaanderen.be>



Figuur 7: Voorbeeld van schematische voorstelling van de (kwantitatieve) hydrologische processen in verschillende wetlands. De onderste figuur geeft een voorbeeld van een combinatie van meerdere processen (naar Acreman & Miller, 2006).

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.

### 3 Ontwerp en uitwerking

In de ontwerp- en uitwerkingsfase wordt het conceptueel model vertaald in een kwantitatieve mathematische structuur. In deze fase worden methodologische keuzes gemaakt.

#### 3.1 Tijdsafhankelijk (transient state) of tijdsafhankelijk (steady state)

Een tijdsafhankelijk model is realistischer, maar ook complexer. Er zijn meer parameters (bergingscoëfficiënt) in een dergelijk model en de kalibratie is moeilijker. De extra complexiteit moet 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 dynamische standplaatsvariabelen (GxG's) te berekenen.

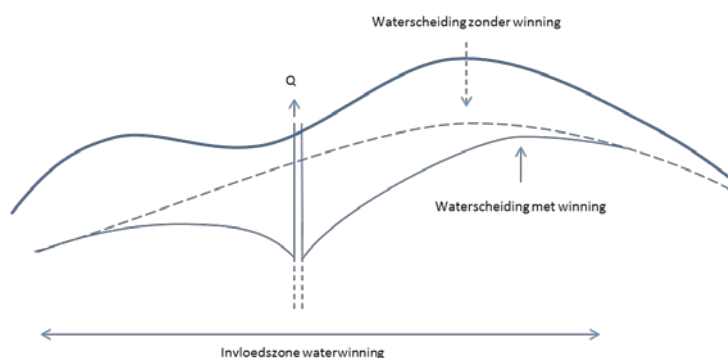
*Aandachtspunt: In sommige studies worden twee tijdsafhankelijke modellen gecombineerd: één voor een zomersituatie en één voor de wintersituatie. Een grondwatermodel voor een zomer- of wintertoestand stelt echter per definitie geen evenwichtssituatie voor. De modellen worden voor een bepaalde periode in het jaar gekalibreerd door de grondwatervoeding uit neerslag aan te passen en te fitten aan de veldmetingen. Het voorspellend vermogen van een dergelijk model is beperkt.*

#### 3.2 Modelgrenzen (horizontaal)

De keuze van de randvoorwaarden hebben een invloed tot ver in het gemodelleerde gebied. De modelgrenzen moeten met een ruime buffer rond het studiegebied worden gekozen. Hoe groter de onzekerheid over de randvoorwaarden, hoe groter de vereiste buffer.

De modelgrenzen worden 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.

*Aandachtspunt: ingrepen in het grondwatersysteem kunnen de interactie met het oppervlaktewatersysteem wijzigen en ook de ligging van de waterscheiding verplaatsen (figuur 8). De modelgrens moet voldoende ver van de invloedssfeer van de ingreep liggen zodat het effect van de randvoorwaarden verwaarloosbaar is.*



Figuur 8: Invloed van een grondwaterwinning op de ligging van de waterscheiding.



### 3.3 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 gedetailleerde spatiale resolutie is niet voor het hele modelgebied vereist. Met lokale verfijning van de resolutie blijft de rekentijd beperkt, zonder af te dingen op de nauwkeurigheid.

De ruimtelijke discretisatie wordt ook lokaal verfijnd 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: Een hoge spatiale resolutie in het hele modelgebied levert ogenschijnlijk een hoge detailgraad, maar draagt niet essentieel bij tot betere modelresultaten.*

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

*Aandachtspunt: Bij lokale verdichting is het aangeraden om het verschil in volume tussen naburige cellen te beperken tot een maximale verhouding 1,5.*

### 3.4 Verticale indeling en gelaagdheid

Wanneer de verticale grondwaterstroming 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. Dit geldt zeker voor het correct modelleren van de variatie in stijghoogte in dikke relatief weinig doorlatende systemen.

### 3.5 Topsyteem

Voor ecohydrologische studies is het topsysteem van het grondwatermodel cruciaal. Het topsysteem bepaald 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 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 dit in detail 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 kwel (of seepage) in het model eenduidig te definiëren. Een ingreep 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 minstens drie packages voor het topsysteem: RIVER, DRAIN en SEEPAGE (Batelaan & De Smedt, 2004).

*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.*

*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 dan aangewezen om bovenste modellaag op te splitsen in twee of meerdere lagen.*

### 3.6 Temporele discretisatie

In een tijdsafhankelijk grondwatermodel (transient state) moet de tijdsdiscretisatie (de lengte van de tijdstappen) voldoende klein zijn om numerieke fouten 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 onttrekking).

Op langere termijn blijkt in de praktijk een wekelijkse of tweewekelijkse tijdsstap geschikt. Net na een sterke wijziging in het grondwatersysteem (stress) is vaak een kortere tijdsstap vereist. De tijdsstappen komen idealiter overeen met de meetfrequentie van de stijghoogtemetingen (meestal maandelijks tot tweewekelijks) die gebruikt worden voor de kalibratie.

*Aandachtspunt: Wanneer het tijdsafhankelijk model dient om grondwaterdynamische variabelen te berekenen (vb. GxG's) moet de keuze van de tijdsstap daarmee in overeenstemming zijn.*

### 3.7 Grondwatervoeding

De grondwatervoeding hangt af van het bodemtype, het landgebruik en de grondwaterstand. Een kaart met de gedistribueerde grondwatervoeding voor Vlaanderen werd berekend door Batelaan *et al.* (2007). De gemiddelde grondwatervoeding werd in deze studie geschat op 222 mm/jaar (standaardafwijking +/- 83 mm). Er zijn echter grote regionale en lokale verschillen.

Een alternatieve methode voor de berekening van de grondwatervoeding is het softwarepakket SWAP (Soil, Water, Atmosphere, Plant)<sup>8</sup>. SWAP is een 1D-model dat gewasgroei en de stroming doorheen de onverzadigde zone simuleert.

*Aandachtspunt: De grondwatervoeding hangt deels af van de grondwaterstand in het topsysteem. De grondwatervoeding wordt daarom best iteratief berekend op basis van de output van het grondwatermodel.*

### 3.8 Initiële waarden

Bij een tijdsafhankelijk model (steady state) hebben de initiële waarden geen invloed op het eindresultaat. Voor tijdsafhankelijke modellen (transient state) is de keuze van de initiële waarden wel zeer belangrijk. Er moeten voldoende tijdstappen (burn-in) worden doorlopen vooraleer de initiële condities geen invloed meer hebben op het modelresultaat. Als initiële conditie voor een tijdsafhankelijk model worden vaak de modeluitkomsten van een tijdsafhankelijk model gebruikt.

## 4 Specifieke aandachtspunten

- De 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.
- Controleer of de onttrekking van grondwater in het grondwatermodel niet droogvalt. De meeste software zal hier niet voor waarschuwen.
- De meeste grondwatermodellen veronderstellen een constante dichtheid van het water in het systeem. Grondwater met een hoge saliniteit (nabij de kust of in sommige polders)

---

<sup>8</sup> <http://www.swap.alterra.nl>

heeft een hogere densiteit. Een grondwatermodel voor regio's met een grote variatie in densiteit moet hier rekening mee houden.

- Om verdroging of zetting te beperken wordt vaak retourbemaling toegepast en/of wanden geplaatst. Bijlage 6 van Richtlijnen bemaling (VMM, 2019) bespreekt in detail hoe dergelijke structuren in Modflow ingegeven worden.

## 5 Modelkalibratie en verificatie

Kalibratie bestaat uit het aanpassen van onzekere modelparameters zodat het modelresultaat beter overeenkomt met de veldwaarnemingen. Naast stijghoogtemetingen zijn ook hydraulische waarnemingen (waterstanden en debieten in de waterlopen) erg nuttig voor een goede kalibratie. Sommige indirecte waarnemingen en 'soft data' (bv. vegetatiegegevens) kunnen bruikbaar zijn om de ruimtelijke variatie in de voorspelde watertafeldieptes en kwelfluxen af te toetsen.

De selectie van de parameters en de range waarbinnen de kalibratie plaatsvindt wordt bij aanvang vastgelegd. Wanneer de nauwkeurigheid van het model na kalibratie niet volstaat kan het zijn dat het conceptueel model moet worden herzien.

Het grondwatermodel wordt gebruikt om effecten in een toekomstige stresssituatie te voorspellen. Te sterk doordrijven van de kalibratie verhoogt de kans op 'overfitting'. Meer parameters aanpassen kan de fit met de metingen verbeteren, maar gaat ten koste van het voorspellende vermogen van het model.

*Aandachtspunt: Het is noodzakelijk de waterbalans van het hele modelgebied en van deelgebieden te verifiëren. Een modelkalibratie kan ondanks een goede fit, toch onrealistische waarden opleveren voor modelparameters, de waterbalans en de interactie met het oppervlaktewatersysteem.*

*Aandachtspunt: De meetlocaties voor de kalibratie moeten goed verspreid zijn over het hele modelgebied en over alle modellagen en mogen niet beperkt blijven tot het focusgebied. Een slechte spreiding van de meetlocaties leidt tot een onevenwichtige kalibratie. Eventueel kunnen sterk geclusterde meetlocaties een lager gewicht krijgen in de kalibratieprocedure.*

Een formele verificatie van de modelparameters is pas mogelijk wanneer de metingen worden gesplitst in een kalibratiedataset (voor het zoeken van de optimale parameterwaarden) en een validatiedataset (om de nauwkeurigheid van het model in te schatten). Vaak zijn hiervoor onvoldoende meetpunten 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 hiervoor werd gebruikt: de hele dataset, de kalibratiedataset of een validatiedataset.*

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

*Aandachtspunt: Een parameter die in de huidige toestand van het grondwatersysteem weinig belangrijk is, kan voor een toekomstige toestand wel belangrijk zijn. De huidige toestand laat niet altijd toe alle parameters goed te kalibreren. Zo is bijvoorbeeld de intreeweerstand<sup>9</sup> 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 onttrekking),*

---

<sup>9</sup> De weerstand van de waterloop naar het grondwater (d/m)

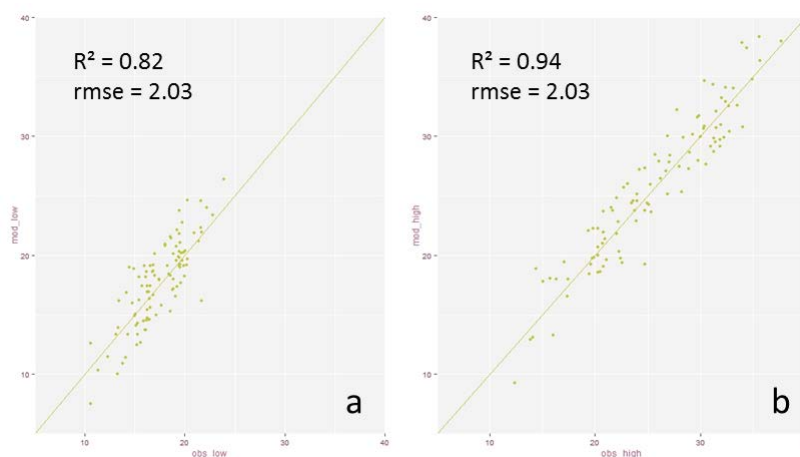
wordt de intreeweerstand plots wel erg belangrijk en weegt deze sterker door in de nauwkeurigheid van de modelberekening. Een pompproef kan hierbij extra informatie leveren.

Bij de validatie van het grondwatermodel is het moeilijk een minimum te halen criterium vast te leggen. Men kan wel verwachten dat een nieuw grondwatermodel minstens even goed scoort dan een voorgaande modellering in hetzelfde gebied.

Naast correlatiematen is het noodzakelijk ook de absolute fout te analyseren. Vooral de fout op de voorspelde diepte van de watertafel is van belang om de gevolgen van modelfouten voor latere toepassingen in te schatten.

*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 of de root mean square error (rmse) zijn wel bruikbaar.*

*Aandachtspunt: De correlatie ( $R^2$ ) van de absolute stijghoogte tussen de gemeten en de berekende waarden is geen geschikte maat voor de kwaliteit van een grondwatermodel. De grondwaterstand (in m TAW) wordt immers sterk bepaald door het reliëf. 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 9).*



Figuur 9: 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.

## 6 Voorspelling en scenario's

Bij het doorrekenen van scenario's is controle van de grondwaterwinningen noodzakelijk. Controleer of het grondwater niet zakt tot onder de filter van de winningsput. De gemodelleerde stijghoogte in de put is niet de reële diepte. In de nabije omgeving van de put zal de gemodelleerde verlagingskegel afwijken van de reële verlagingskegel omwille van het 'putverlies'. Omwille van fysische belemmeringen zal het peil in de put vaak lager zijn dan wat op basis van de hydrogeologische eigenschappen wordt verwacht.

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

## 7 Rapportage

Het doelpubliek van de rapportage bestaat uit experts die een technische evaluatie van het modelleringsproces moeten maken en uit niet-experts die vooral de resultaten en de conclusies moeten begrijpen. Voor de eerste groep is het aangewezen dat de rapportage voldoende gedetailleerd is om op basis van de tekst, cijfers en figuren het model en het modelleringsproces te begrijpen. Voor de tweede groep is een niet-technische samenvatting wenselijk.

De rapportage wordt best grotendeels chronologisch opgebouwd volgens de stappen in het modelleringsproces, aangevuld met enkele extra hoofdstukken (o.a. conclusies en aanbevelingen, referenties en een bijlage met verwijzing naar de digitale bestanden).

De informatie in de rapportage moet zodanig opgevat zijn dat de resultaten van de studie op een later moment gereproduceerd kunnen worden. De digitale bestanden worden aangeleverd in een open formaat. De tekst (of een bijlage) bevat duidelijk informatie over de locatie, het formaat en de inhoud van de digitale bestanden. In tabel 2 staat een checklist voor de belangrijkste punten in de rapportage.

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

| Onderdeel  | Opmerkingen  |
|--|--|
| <b>Planning &amp; doelstelling</b>   |  |
| Formulering van de doelstellingen van het project  |  |
| 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. |
| Bespreking van de vereiste nauwkeurigheid van het model.   | Beschrijving hoe de nauwkeurigheid wordt gemeten en een motivatie waarom die nauwkeurigheid vereist is.          |
| Bespreking van de grenzen waarbinnen het model kan worden toegepast  | Schaal, geografisch begrenzing binnen het modelgebied, aard van de scenario's, ...                               |
| Eenduidige omschrijving van de verschillende door te rekenen scenario's  |  |
| <b>Systeemanalyse en conceptueel model</b>   |  |
| Bespreking van de geconsulteerde externe databronnen en literatuur   |  |
| Beschrijving van de hydrogeologische opbouw in het studiegebied  | Hydrostratigrafie, reikwijdte, diepte, dikte, afgesloten, niet-afgesloten, breuken, doorlatendheden, ...         |
| Beschrijving van alle interacties met het grondwater   | Infiltratie, evapotranspiratie, interactie met rivieren, beken en meren, grondwaterwinning, ...                  |
| Bespreking van de stijghoogtemetingen  |  |
| Bespreking van aan- en afvoer  | Basisafvoer, onttrekkingen, ...  |
| Onzekerheidsanalyse  | Aandacht voor onzekerheden op de metingen  |

|  |   |
|--|---|
| Beschrijving van het conceptueel model                                   | Kaart, verticale doorsneden, ...  |
| Consistentie tussen objectieven en conceptueel model                     | Alle relevante hydrologische processen? verantwoording voor vereenvoudigingen? alternatieve conceptuele modellen?   |
| <b>Ontwerp en uitwerking</b>   |   |
| Consistentie tussen het rekenmodel en het conceptueel model              |   |
| Keuze van de modeltechniek en software                                   | Zijn modeltechniek en software geschikt en betrouwbaar? Wordt de software beschreven in de literatuur? 1D, 2D of 3D?  |
| Reikwijdte van het modelgebied en horizontale discretisatie              | Voldoende grootte reikwijdte lateraal. Horizontale en verticale discretisatie.  |
| Verticale indeling van de aquifers en aquitards.                         | Indeling van de hydrogeologische lagen in één of meerdere modellagen.   |
| Steady state of transient.   | Indeling tijdstappen, stress periodes   |
| 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 |
| Infiltratie  | Diffuus of spatiaal. Tijdsafhankelijk of gemiddeld  |
| Beschrijving van het topsysteem (interactie grondwater/oppervlaktewater) | Beschrijving hoe kwel wordt gemodelleerd. Interactie met het oppervlaktewatersysteem. Koppeling. Dynamische of statische koppeling  |
| Initiële condities   | Beschrijving van de initiële condities. Effect van initiële condities op de modelresultaten.  |
| Numerieke resultaten   | Beschrijving van de oplossingsmethode (solver), de convergentiecriteria en numerieke precisie   |
| <b>Kalibratie en sensitiviteitsanalyse</b>                               |   |
| Beschrijving van de data gebruikt voor de kalibratie                     | Stijghoogtemetingen, debietsmetingen, ...   |
| Beschrijving van de kalibratiemethode                                    | Manueel, (half)geautomatiseerd, te kalibreren parameters, kalibratieranges, optimalisatiefunctie en convergentiecriteria  |

|   |   |
|---|---|
| Sensitiviteitsanalyse   | Sensitiviteit t.a.v. één of meerdere parameters, randvoorwaarden, initiële condities, stress  |
| Presentatie van de kalibratieresultaten   | Figuren met geschikte schaal, relatieve en absolute waarden, ruimtelijke en temporele afwijkingen, Kalibratiestatistieken, RMSE, ...  |
| Interpretatie van de kalibratieresultaten   | Zijn de bekomen parameters aannemelijk,   |
| Waterbalans   | Zijn de waterbalansen realistisch? Voor het hele gebied als voor deelgebieden. Uitwisseling met oppervlaktewatersysteem. Kwel, infiltratie, ...   |
| Modelverificatie  | Presentatie van de goodness of fit met onafhankelijke metingen, niet gebruikt in de kalibratie  |
| <b>Predicties</b>   |   |
| Informatie over de onzekerheden   |   |
| Beschrijving van de implementatie van de scenario's in het model<br><br>Blijven de ingrepen binnen ranges waarvoor het model werd gekalibreerd? | Vb. gewijzigde winningen. Aandacht voor reductie in betrouwbaarheid van het model   |
| 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 |
| <b>Onzekerheden</b>   |   |
| Beschrijving (kwantitatief of kwalitatief) van de onzekerheden op de predicties   | Beschrijving van de methodologie om onzekerheid in te schatten. Figuren en tabellen i.v.m. onzekerheid.   |
| Bespreking van de belangrijkste bronnen van onzekerheid   | Onzekerheid op de metingen, modelonzekerheid, ...   |

# Afkortingen en begrippen

## 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

## Begrippen

Begrippen zoals in de tekst worden gebruikt.

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

\*\* = verklaring van het begrip overgenomen uit Richtlijnen bemaling (VMM, 2019)

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

**Afpompingskegel / Verlagingskegel:** kegelvormige droge zone die ontstaat door het wegpompen van grondwater uit een filter/bron. De gebogen wanden van de kegel worden verhanglijnen genoemd. Bij bemalingen die zich binnen elkaars invloedzone bevinden kunnen gemeenschappelijke verhanglijnen ontstaan.\*\*

**Bemaling van grondwater:** Het tijdelijk of permanent verlagen van de natuurlijke grondwaterstand door het oppompen van grondwater.\*\*

**Bergingscoëfficiënt (storage coëfficiënt / storativity) (S) (-):** De hoeveelheid water die 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).

**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):** De capaciteit om water door te laten. Wordt aangeduid met de doorlatendheidscoëfficiënt,  $k$  (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 voorjaarsgrondwaterstand : dit is de grondwaterstand aan het begin van het groeiseizoen; men kan hiervoor gebruik maken van 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.

**Effectieve porositeit:** Deel van het poriënvolume dat migratie van grondwater toelaat. Dit is de totale porositeit verminderd met het aandeel aan water dat gebonden is aan de bodempartikels ( $m^3/m^3$ ).\*\*

**Freatisch grondwater:** Grondwater dat rechtstreeks in verbinding staat met de atmosferische luchtdruk en zich vrij kan bewegen in een watervoerende laag.\*\*

**Grondwater:** Al het water dat zich onder het bodemoppervlak in de verzadigde zone bevindt of dat in direct contact met bodem en ondergrond staat.\*\*

**Grondwaterstand:** de hoogte t.o.v. een referentieniveau (bv. m TAW) 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.

**Grondwatervoeding uit neerslag:** aanvulling van het grondwater via infiltratie en percolatie van neerslag (m/dag).

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

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

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

**Retourbemaling:** Bij een diepte-infiltratie wordt het opgepompte bemalingswater (via onttrekkingsbronnen) op een bepaalde afstand van de bemalingszone terug in dezelfde watervoerende laag geïnjecteerd (via retourbronnen). Ook oppervlakte-infiltratie, waarbij freatisch grondwater kan infiltreren in de ondergrond via infiltratiegrachten of -bekkens, wordt beschouwd als retourbemaling.\*\*

**Speciale Beschermingszone (SBZ):** onderdeel van het Natura 2000-netwerk. Een SBZ kan nog verder bestaan uit verschillende 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.

**Stijghoogte:** De waterhoogte die wordt gemeten met een piëzometer.

**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 evenwicht.

**Transmissiviteit (T):** De doorlatende eigenschappen van een watervoerende laag als geheel, uitgedrukt als het product van de doorlatendheidscoëfficiënt  $k$  en de dikte  $H$  van een bepaalde laag. Doorlaatvermogen of transmissiviteit ( $m^2/d$ ) wordt bepaald aan de hand van een pompproef.\*\*

**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 filtersectie beperkt tot een deel van de watervoerende laag\*.

**Watervoerende laag / aquifer:** Een grondlaag die voldoende poreus en doorlatend is voor een (belangrijke) grondwaterstroming of voor de onttrekking van (aanzienlijke) hoeveelheden grondwater.\*\*

**Waterremmende laag / aquitard:** Een met water verzadigde grondlaag die weinig doorlatend is.\*\*

**Waterscheiding:** grens tussen twee stroomgebieden\*

## Referenties

Acreman MC & 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.

AGT (2020). Verduidelijking Richtlijnen Bemalingen - Addendum bemaling lijntrajecten. 2020 11 05-RHON-AGT3293-lijntrajecten-v1. Rapport in opdracht van VLARIO vzw. 40 p.

AGT (2021). Berekeningsinstrument bemalingen van lijntrajecten. Handleiding: VLARIO. 16 p.

Barnett B., Townley L.R., Post V., 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. & Desmedt F. (2004) SEEPAGE, a New MODFLOW DRAIN Package. Ground Water 24 (4): 576-588.

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.

Bruggeman G.A. (1999). Analytical Solutions of Geohydrological Problems. Maartensdijk, Nederland: Elsevier Science. 959 p.

De Becker P. (2020). Ecohydrologische gebiedsbeschrijvingen van natuurgebieden in Vlaanderen in het kader van PAS. Brussel: INBO. <https://doi.org/10.21436/inbor.17256788>

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.

Departement Omgeving. (2021). Milieueffectrapportage richtlijnenboek: Water (versie 01/02/2021): Departement Omgeving. 161 p.

Driscoll F.G. (1986). Groundwater and wells. Minnesota: Johnson Filtration Systems.

Dupuit J. (1857). Mouvement de l'eau a travers le terrains permeables. C R Hebd Seances Acad Sci 45:92-96.

Edelman J.H. (1972). Groundwater hydraulics of extensive aquifers. Bulletin 13. Wageningen, Netherlands.: International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRZ).

Hooghart J.C. (1986). Verklarende hydrologische woordenlijst. Gespreksgroep Hydrologische Terminologie. Rapporten en nota's 16. 's Gravenhage: Commissie voor hydrologisch Onderzoek TNO. 127 p.

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.

Marsily G. (1986). Quantitative hydrogeology : groundwater hydrology for engineers: Academic Press. 440 p.

Refsgaard J.C. & Henriksen H.J. (2004) Modelling guidelines - terminology and guiding principles. Advances in Water Resources 27 (1): 71-82. 10.1016/j.advwatres.2003.08.006

Reilly T.E. & Harbaugh A.W. (2004). Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models. Scientific Investigations Report 2004-5038. Virginia, US: USGS. 37 p. 10.3133/sir20045038

Srivastava R. & Guzman-Guzman A. (1998). Practical approximations of the well function. Ground Water 36(5):844-848.

STOWA-RIZA. (1999). Vloeiën 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.

Verruijt A. (1970). Theory of Groundwater Flow. London: Macmillan.

VMM (2019). Richtlijnen bemalingen ter bescherming van het milieu. Aalst: VMM. 199 p.

VMM (2020). Berekeningsinstrument bemaling van een bouwput. Handleiding. versie 1.0. Aalst: VMM. 25 p.