

Advies over de module grondwater van de voortoets

Adviesnummer:	<u>INBO.A.4102</u>
Auteurs:	Toon Van Daele & Piet De Becker
Contact:	Lieve Vriens (lieve.vriens@inbo.be)
Kenmerk aanvraag:	ANB-INBO-2020-33
Geadresseerden:	Agentschap Natuur & Bos VAC Brussel - Herman Teirlinck T.a.v. Tine Mandonx Havenlaan 88 bus 75 1000 Brussel tine.mandonx@vlaanderen.be
Cc:	Agentschap Natuur & Bos Joris Janssens (joris.janssens@vlaanderen.be)

Dr. Maurice Hoffmann
Administrateur-generaal wnd.

Wijze van citeren: Van Daele T. & De Becker P. (2021). Advies over de module grondwater van de voortoets (Adviezen van het Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek; nr. INBO.A.4102). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Aanleiding

De voortoets is een online-instrument om de implicaties van aanvragen voor vergunningsplichtige activiteiten op speciale beschermingszones (SBZ) te screenen. Wanneer de voortoets aangeeft dat er geen risico of waarschijnlijkheid bestaat op een betekenisvolle aantasting van de habitats, dan moet de initiatiefnemer geen passende beoordeling opmaken. Is er wel een waarschijnlijkheid of een risico, dan is verder onderzoek door de initiatiefnemer of overleg met het Agentschap Natuur & Bos (ANB) aangewezen om te bepalen of er een betekenisvolle aantasting kan zijn. Hieruit blijkt dan of een passende beoordeling is vereist (<http://voortoets.omgeving.vlaanderen.be>).

Voor de aanpassing van de voortoets heeft het ANB een aantal technische vragen met betrekking tot de werking van de module 'verdroging/vernatting' en mogelijke verbeterpunten. Het doel van dit advies is de keuzes voor aanpassingen te ondersteunen. Een aantal aanpassingen kan vrij eenvoudig worden uitgevoerd, andere aanpassingen vereisen een meer uitgebreide voorbereidende hydrologische studie.

Vragen

1. Momenteel maakt de voortoets voor de berekening van de invloedsafstand geen onderscheid tussen continue en periodieke grondwaterwinningen.
 - a. In welke mate verschillen de formules van Dupuit en Verruijt? Is het vanuit het worst case perspectief te verantwoorden om periodieke grondwaterwinningen in de voortoets met de formule van Verruijt te beoordelen?
 - b. Is dit mogelijk een onderschatting en implementeren we best een andere formule (bv. Theis) in de voortoets? Wat is de maximale zoekafstand voor de verlagingscontour?
2. De voortoets splitst momenteel lijnbemalingen op in diverse puntbemalingen en past vervolgens de formule voor puntbronnen toe. Is deze benadering te vergelijken met de formule van Edelman? Zijn er grote verschillen en is het eventueel noodzakelijk om over te schakelen op Edelman?
3. Welke formule wordt momenteel in de voortoets gebruikt voor de bemaling van bouwputten? Kunnen we voor deze module best overschakelen op de formule van Dupuit (analoog aan de VMM exceltool) ? Welk verschil zou dit geven ten aanzien van de huidige methode?
4. Om het effect van een peilverlaging in een gracht op de grondwaterstand te berekenen past de voortoets de formule van Marsily toe. Voor het aanleggen of dempen van een drainage past de voortoets de formule van Hooghoudt toe. Wat is het verschil tussen beide activiteiten?
5. Voor welke aantallen van grondwaterwinningen is het te verantwoorden om met de analytische formules in de voortoets te rekenen? Hoe kunnen de cumulatieve effecten met analytisch formules correct beoordeeld worden? Kan dan het superpositie principe worden toegepast?

6. De voortoets gebruikt de WetSpass-data¹, maar die zijn niet geschikt om beoordelingen op puntlocatie uit te voeren. Als de grondwaterwinning enkele meters verschuift kan dat een grote impact hebben op de grondwatervoeding en daardoor ook op de verlagingscontour van de voortoets.
7. Er wordt gerekend met een standaard grondwaterstand van 1 m-mv, is dat voldoende worst case? Zou het niet beter zijn op basis van de geologie (HCOV-kaart: basiseenheid 1e aquifer) een grondwaterstand te definiëren?

Toelichting

1. Inleiding

De voortoets maakt voor het thema grondwater gebruik van een aantal relatief eenvoudige analytische formules. Met deze formules wordt de reikwijdte van een peilverlagende of peilverhogende activiteit ingeschat. De keuze van de formules en de uitwerking ervan staan beschreven in Bronders *et al.* (2013).

De analytische formules maken in grote mate abstractie van de realiteit met een heel schematische voorstelling van het grondwatersysteem. Dit heeft als voordeel dat met beperkte informatie een inschatting van de reikwijdte van een verlagend effect kan worden berekend. De formules zijn correct voor de hypothetische situatie die ze voorstellen, maar de reële situatie op het terrein is meestal veel complexer. Daardoor is deze benadering helemaal niet nauwkeurig. Om de dynamiek in de waterhuishouding in natuurgebieden in kaart te brengen moeten heel wat variabelen meerdere jaren opgevolgd worden. Zowel de dynamiek binnen het jaar (winter, voorjaar en zomer) als tussen de jaren is zeer determinerend voor de vegetaties. Daarenboven zijn grondwatersystemen zelden in evenwicht door veranderingen in het landschap en activiteiten in de omgeving.

Deze analytische formules in de voortoets kunnen een grondige hydrologische studie dus niet vervangen, maar mits een doordachte keuze van de variabelen in de formules is het wel mogelijk om een maximaal te verwachten verlaging of 'worst case' situatie in te schatten. De keuze van de methode en de bijhorende variabelen is dus een afweging tussen een al te grote overschatting van de reikwijdte vermijden en tegelijk de kans op een onderschatting tot een absoluut minimum beperken.

2. Periodieke en continue onttrekkingen

2.1 Vergelijking van de formules van Verruijt en Dupuit

Om af te stemmen met de methode die door de Vlaamse Milieumaatschappij (VMM) wordt gebruikt kan in de voortoets geopteerd worden voor de formule van Dupuit in plaats van de formule van Verruijt. We leggen de verschillen tussen beide formules hieronder uit met een conceptueel schema (Figuur 2.1) en een rekenvoorbeeld (Figuur 2.2)

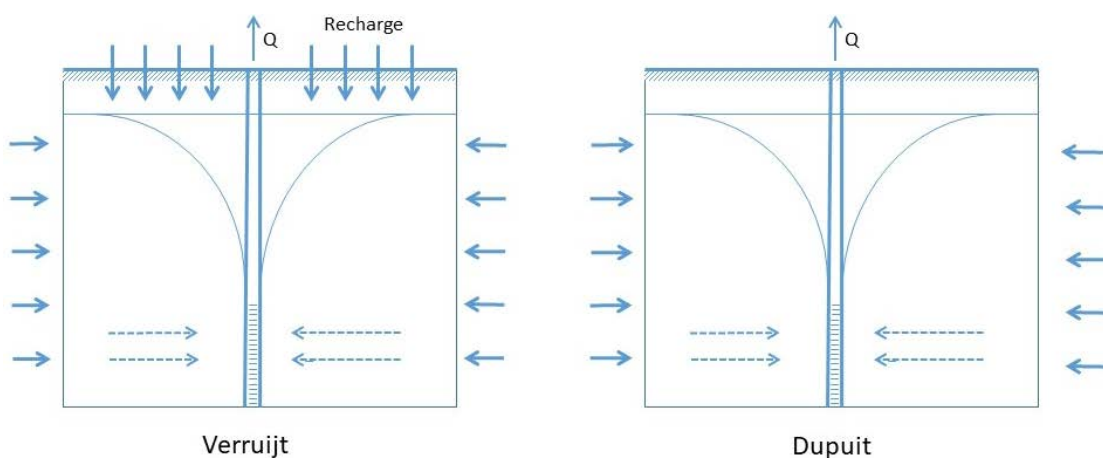
De formule van Verruijt (Verruijt, 1970) is een stationaire formule. De formule berekent de verlagingskegel naar een puntonttrekking voor een systeem in evenwicht en houdt daarbij rekening met de grondwatervoeding uit neerslag binnen de verlagingskegel (Figuur 2.1). Het is een theoretische gemiddelde situatie, die geen rekening houdt met seizoensvariaties. Als gevolg van de variaties in grondwaterstand doorheen het jaar zal de invloedsafstand in de zomer toenemen en in de winter weer afnemen. Om de variatie van de invloedsafstand doorheen het jaar in te schatten is een tijdsafhankelijke numerieke modellering vereist.

¹ *WetSpass is een stationair simulatiemodel voor water- en energietransport in bodem, plant en atmosfeer.*

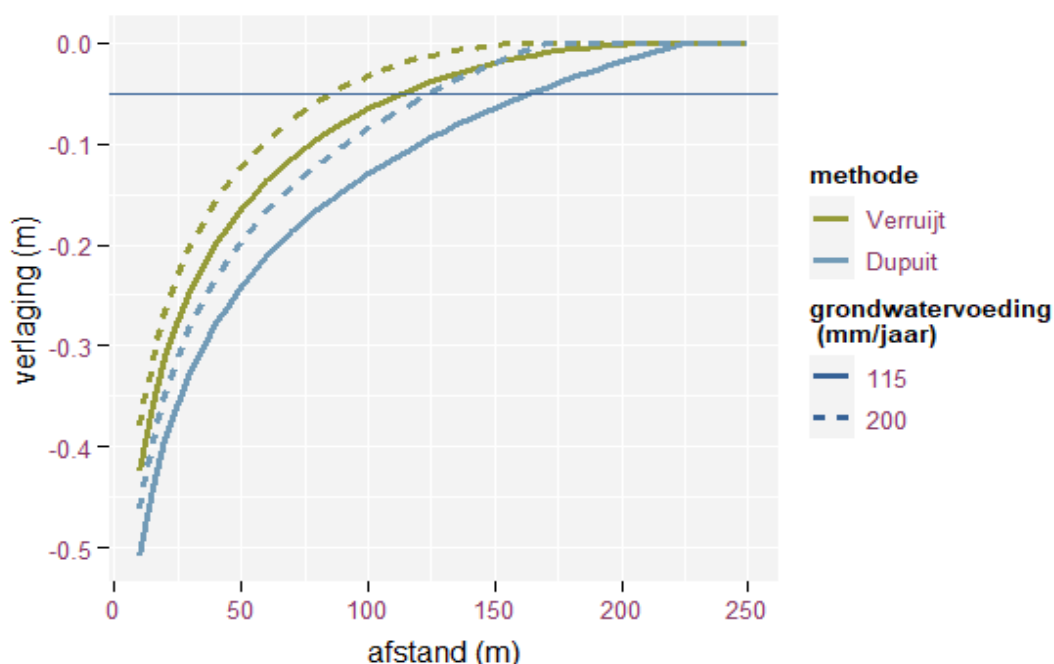
De formule van Dupuit (Dupuit, 1857) wordt o.a. gebruikt in het Excel berekeningsinstrument van VMM voor een bemaling in een bouwput (VMM, 2020). Het is ook een stationaire formule. Het verschil met de formule van Verruijt is dat deze formule geen rekening houdt met de grondwatervoeding uit neerslag binnen de contour van de verlagingkegel. De curve kent daarom een steiler verloop (Figuur 2.2).

De formule van Dupuit beschouwt enkel laterale aanvoer van grondwater uit de watervoerende laag zelf wat mogelijk beter aansluit bij de situatie in een zomerperiode zonder grondwatervoeding uit neerslag.

Voor beide formules moet een invloedsafstand als randvoorwaarde worden opgegeven. Dit is de afstand waarop er geen effect meer wordt verondersteld. In de voortoets wordt deze afstand berekend als de straal van een cirkel waarbinnen de gemiddelde grondwatervoeding uit neerslag de onttrekking volledig compenseert (zie § 2.4).



Figuur 2.1: Conceptuele schema's voor de benadering met de formule van Verruijt en de formule van Dupuit (Q = onttrokken debiet, Recharge = grondwatervoeding uit neerslag)



Figuur 2.2: Berekende verlaging in functie van de afstand tot de onttrekking voor de formule van Dupuit en Verruijt bij twee verschillende waarden voor grondwatervoeding uit neerslag. De blauwe horizontale lijn geeft 5 cm onder de initiële grondwaterstand weer

Uit het rekenvoorbeeld van figuur 2.2 zien we dat de formule van Dupuit met een invloedsafstand berekend voor een grondwatervoeding uit neerslag van 200 mm/jaar min of meer dezelfde 5 cm contour oplevert als de formule van Verruijt met 115 mm/jaar grondwatervoeding uit neerslag. Wanneer de grondwatervoeding uit neerslag voldoende laag wordt gekozen is de huidige methode van de voortoets met de formule van Verruijt een goede benadering (zie ook § 7). Vaak wordt voor Vlaanderen standaard 200 mm/jaar aangenomen voor de grondwatervoeding. De grondwatervoeding in de voortoets is beperkter, gemiddeld 115 mm/jaar.

De waarde van de grondwatervoeding is in de voortoets cruciaal voor de berekening van de invloedsafstand. We adviseren om met een uitgebreidere studie en een tijdsafhankelijke numerieke modellering te bepalen welke waarde voor de grondwatervoeding in Vlaanderen geschikt is zodat voldoende rekening wordt gehouden met seizoensverschillen, droge jaren en de te verwachten toename aan droge periodes onder invloed van klimaatverandering (zie ook § 7).

2.2 Formule van Theis

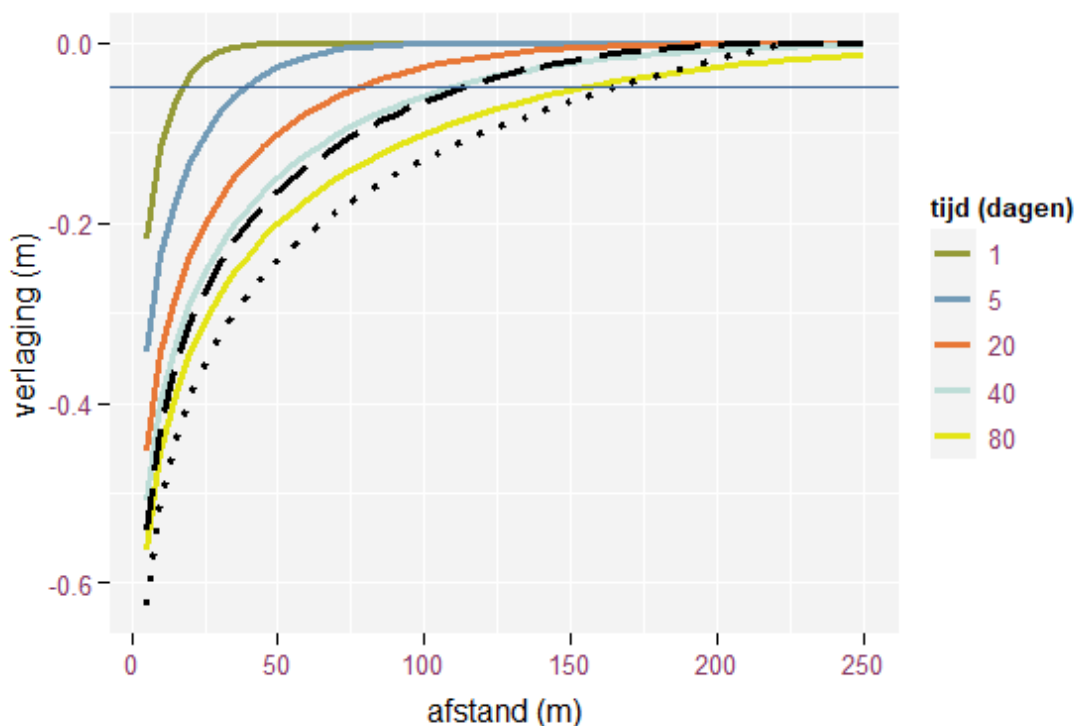
Bij periodieke grondwateronttrekkingen, waar het grondwater in een beperkte periode van het jaar wordt onttrokken, is het grondwatersysteem niet in evenwicht. De grondwaterstandsaling neemt toe met de tijd. Wanneer de onttrekking zich concentreert in een droge periode kan de verlaging dan ook aanzienlijk groter zijn dan wat berekend wordt voor een evenwichtssituatie.

Voor een onttrekking van korte duur kan gebruik gemaakt worden van de tijdsafhankelijke formule van Theis (Theis, 1935). De formule houdt geen rekening met grondwatervoeding uit neerslag en veronderstelt louter laterale toevoer van grondwater uit de watervoerende laag zelf. Het kan een goede benadering zijn voor de te verwachten grondwaterstandsaling bij een onttrekking van relatief korte duur en in een droge periode (bv. voor berekening). Voorwaarde is dat de verzadigde dikte van de freatische watervoerende laag voldoende is (Bot, 2011; <http://www.grondwaterformules.nl>) (bijvoorbeeld: verlaging minder dan 10% van de totale dikte). Omdat er geen grondwatertoevoer wordt beschouwd, blijft de invloedsafstand oneindig toenemen. Bij langere duur geeft deze benadering dan ook een grote overschatting van de grondwaterstandsaling.

De formule vereist naast een waarde voor de horizontale doorlatendheid (K_h in m/d) en de verzadigde dikte (D in m) ook een waarde voor de berging (S in m^2/m^2) om de watervoerende laag te karakteriseren. Voor deze berging bestaan tabellen met waarden in functie van de textuur (bv. Lebbe & Vandenbohede (2004), <http://dov.vlaanderen.be>). De berging wordt in de voortoets ook al gebruikt voor de module 'bemaling van een bouwput'.

2.3 Rekenvoorbeeld

Figuur 2.3 toont de verlagingskegel voor een puntonttrekking na verloop van tijd, berekend met drie verschillende formules. Het voorbeeld betreft een continue onttrekking van 50 m³/dag jaarrond met de huidige methode in de voortoets (Verruijt), met de formule van Dupuit en voor een tijdelijke onttrekking (Theis) met hetzelfde dagdebiet.



Figuur 2.3: Verlaging (m) in functie van de afstand (m) met de formule van Theis na 1, 5, 20, 40 en 80 dagen. De verlaging met de formule van Verruijt (zwarte streeplijn) en Dupuit (zwarte stippellijn) staan in het zwart (Overige parameters: $K_h = 5 \text{ m/d}$, $D = 10 \text{ m}$, $S = 0.3 \text{ m}^2/\text{m}^2$, grondwatervoeding = 115 mm/jaar).

In dit rekenvoorbeeld wordt met de formule van Theis dezelfde verlaging bereikt als met de huidige methode in de voortoets (Verruijt) na ongeveer 40 dagen en met de formule van Dupuit na ongeveer 80 dagen. De duur zal sterk verschillen met de berging (S), de horizontale doorlatendheid (K_h) en de verzadigde dikte van de watervoerende laag (D).

Het toevoegen van de formule van Theis voor periodieke of tijdelijke onttrekkingen in de voortoets zou een bijkomende complexiteit betekenen. Er moet immers onderscheid worden gemaakt tussen het maximale dagdebiet en het totale volume per jaar. Er is ook informatie vereist over de maximale duur van de periodieke onttrekking. Ook de periode van de onttrekkingen (winter of zomer) maakt een groot verschil. In Van Daele & De Bie (2015) worden enkele bijkomende aandachtspunten beschreven voor het gebruik van de formule van Theis. Het belangrijkste is de cumulatieve verlaging te berekenen op het einde van het hele beregeningsseizoen en niet enkel voor één enkele beregeningscyclus.

De huidige methode heeft als voordeel dat zowel continue onttrekkingen als periodieke onttrekkingen hetzelfde worden behandeld. Immers ook voor continue onttrekkingen is er variatie in de invloedsafstand in droge en natte periodes. De voortoets vraagt enkel het maximaal dagdebiet en berekent wat het effect zou zijn wanneer dit debiet het jaarrond wordt onttrokken. De grondwatervoeding moet wel zodanig worden gekozen dat voor zowel periodieke als continue onttrekkingen steeds een worst case wordt berekend, ook voor een droge zomerperiode (zie ook § 7).

Wanneer de formule van Theis zou worden overwogen is een hydrologische studie en een vergelijking met niet-stationaire numerieke modellering nodig om na te gaan bij welke maximum- en minimumwaarden voor de verschillende parameters (doorlatendheid, verzadigde dikte, berging en duur) de assumpties van de formule van Theis aanvaardbaar zijn.

De vorm van de verlagingskegel wordt sterk bepaald door de transmissiviteit (verzadigde dikte * horizontale doorlatendheid). De voortoets schat de dikte op basis van informatie uit DOV (Databank Ondergrond Vlaanderen) en de doorlatendheid op basis van tabellen. Het is niet uitgesloten dat de combinatie van beide lokaal een overschatting van de transmissiviteit oplevert. Een zeer hoge transmissiviteit leidt tot een onderschatting van de verlagingskegel. Een meer gedetailleerde analyse van de voortoets is nodig om te bekijken of dit voorkomt. Eventueel kan als (tijdelijke) oplossing een maximale transmissiviteit ($K_h * D$) worden ingesteld.

Het huidige maximaal dagdebiet in de voortoets is zeer hoog (2500 m³/dag). Het merendeel van de grondwaterwinningen onttrekt minder dan 15000 m³/jaar. Bij zeer grote onttrokken volumes is het onwaarschijnlijk dat aan de assumpties van de analytische formules wordt voldaan en is sowieso een numerieke modellering aangewezen. We adviseren om het volume voor de voortoets te beperken tot maximaal 1000 m³/dag.

2.4 Maximale invloedsafstand

Het effect van een onttrekking strekt zich uit tot de waterbalans van de watervoerende laag weer in evenwicht is en het verlies door de onttrekking elders in de watervoerende laag wordt gecompenseerd. Dit kan onder andere door een verminderde afvoer naar het oppervlaktewater, verminderde kwel of verhoogde grondwatervoeding.

Omwille van de eenvoud gebruikt de voortoets enkel de grondwatervoeding uit neerslag om de invloedsafstand te schatten. Hiervoor wordt de 'infiltratie methode' gebruikt (Paradis *et al.*, 2007; EPA, 1994). De invloedsafstand wordt berekend als de straal van een cilinder waarbij de grondwatervoeding uit neerslag de onttrekking volledig kan compenseren. De redenering achter deze methode is niet helemaal correct. De grondwatervoeding uit neerslag is immers niet zonder meer beschikbaar om de onttrekking te compenseren. Uit voorzorg moet de grondwatervoeding dan ook voldoende laag worden genomen zodat de invloedszone voldoende groot wordt geschat (zie ook § 7).

$$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi * Rech}}$$

r = invloedsafstand (m)

Q = onttrokken volume (m³/d)

$Rech$ = grondwatervoeding uit neerslag (m/d)

Voor de iteratieve procedure om de contour van een specifieke verlaging te zoeken kan de maximum zoekafstand gelijk gesteld worden aan deze invloedsafstand.

3. Lijnbemalingen

3.1 Huidige methode voortoets

Het te bemalen debiet wordt verdeeld over puntbronnen die verspreid liggen over de volledige lengte van de lijnbemaling. Het aantal puntonttrekkingen en het verwachte debiet moet de aanvrager zelf ingeven. Voor elke puntonttrekking afzonderlijk wordt de formule van Verruijt toegepast. Daarna worden de 5 cm contouren van alle puntonttrekkingen samengevoegd. De individuele verlagingskegels worden opgeteld (superpositie principe). De puntonttrekkingen kunnen zeer dicht bij elkaar liggen en elkaar sterk beïnvloeden. In dit geval is de superpositie (het eenvoudigweg optellen van de effecten) in een freatische watervoerende laag geen correctie benadering (zie ook § 6). De huidige module berekent hierdoor mogelijk een sterke onderschatting van de 5 cm contour.

Door het opsplitsen van de lijnbemaling in meerdere puntbronnen hangt de omvang van de finale 5 cm contour sterk af van het aantal puntbronnen dat wordt opgegeven. Hoe meer puntbronnen, hoe kleiner de totale contour (zie figuur 3.1). Dit komt doordat elke puntbron afzonderlijk wordt berekend en niet de lijnbemaling als een geheel wordt beschouwd.



Figuur 3.1: 5 cm contour bij lijnbemaling in huidige voortoets. A = 5 putten, B = 10 putten, C = 20 putten (maximum aantal). De gewenste verlaging en het maximum debiet van de bemaling is voor alle drie gevallen hetzelfde.

Bij de huidige benadering moet het maximum (initieel) debiet van de bemaling worden opgegeven. Dit debiet kan op voorhand slechts ruwweg worden ingeschat. In eerste instantie is het zeer hoog en na enkele uren en dagen neemt het sterk af.

3.2 Alternatieve methode: formule van Edelman

In tegenstelling tot de huidige methode is de formule van Edelman (Edelman, 1972) tijdsafhankelijk. De formule beschouwt de grondwaterstroming in parallelle stroombanen. Dit in tegenstelling tot de formule van Verruijt die radiale stroming naar een punt beschrijft. De formule van Edelman (geval 1) berekent voor een gewenste verlaging (h_0) ter hoogte van de bemaling op welke afstand (r) een verlaging van het grondwater (s) op tijdstip (t) wordt bereikt (invcerf = is de inverse van de complementaire error functie).

$$r = \text{invcerf} \left(\frac{s}{h_0} \right) / \sqrt{\frac{S}{4 * Kh * D * t}}$$

r = afstand (m)

S = berging (m^2/m^2)

Kh = horizontale doorlatendheid (m/d)

D = dikte van de verzadigde watervoerende laag (m)

t = tijd (d)

s = verlaging (m)

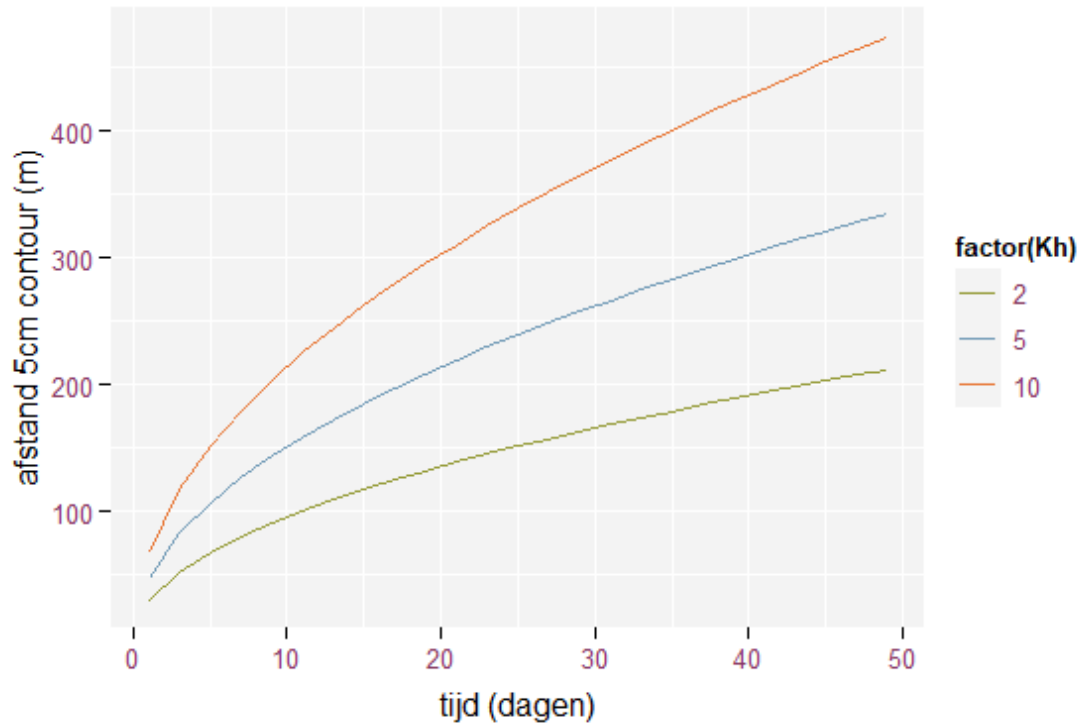
De VMM/VLARIO² stelt sinds kort een rekeninstrument in Excel ter beschikking dat aan de hand van deze formule de te verwachten verlaging (s) op een gekozen afstand en tijdstip berekent.

De formule van Edelman wordt nu ook al in de voortoets gebruikt om het effect van een peilverlaging in een gracht te berekenen. In Bronders *et al.* (2013) wordt hiervoor gerefereerd naar De Marsily (1986), maar het gaat hier over dezelfde formule.

² Overlegplatform & kenniscentrum voor rioleringen- en afvalwaterzuiveringssector

3.3 Rekenvoorbeeld formule Edelman

Bij een hogere doorlatendheid neemt ook de afstand van de 5 cm contour sneller toe (Figuur 3.2).

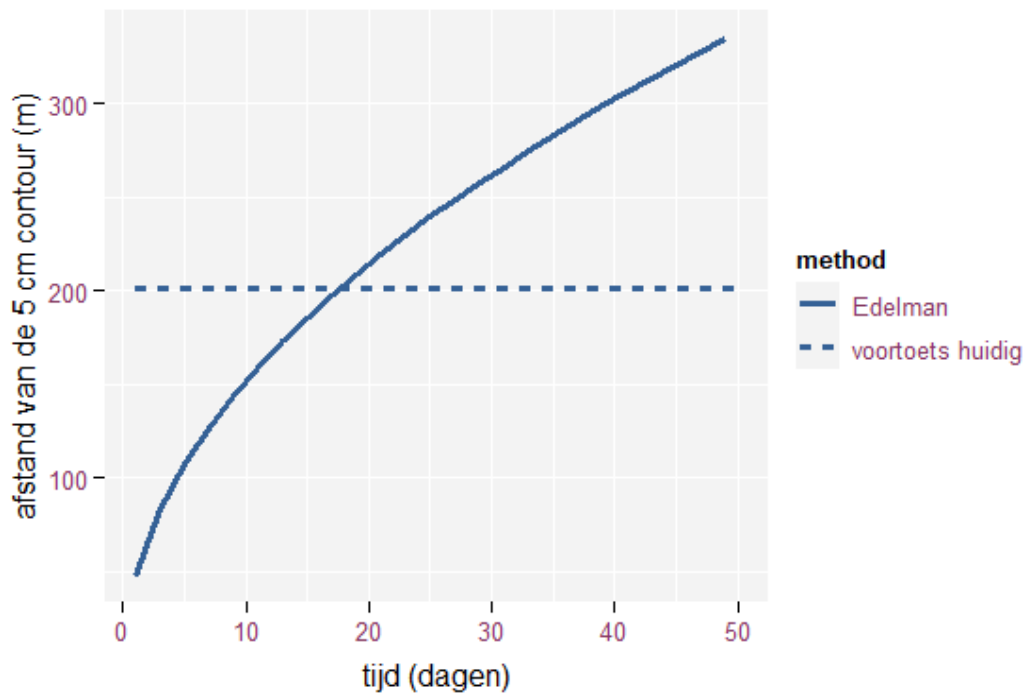


Figuur 3.2: Afstand van de 5 cm contour in functie van de tijd (dagen) bij uiteenlopende horizontale doorlatendheid ($K_h = 2, 5$ en 10 m/d), Verlaging (s) 3 m en berging (S) 0.25.

3.4 Rekenvoorbeeld vergelijking huidige voortoets met Edelman

De huidige methode in de voortoets voor lijnbemalingen is tijdsafhankelijk. De verlagingcontour wijzigt niet na verloop van tijd. Met een rekenvoorbeeld illustreren we het verschil in contour met de tijdsafhankelijke formule van Edelman (Figuur 3.3).

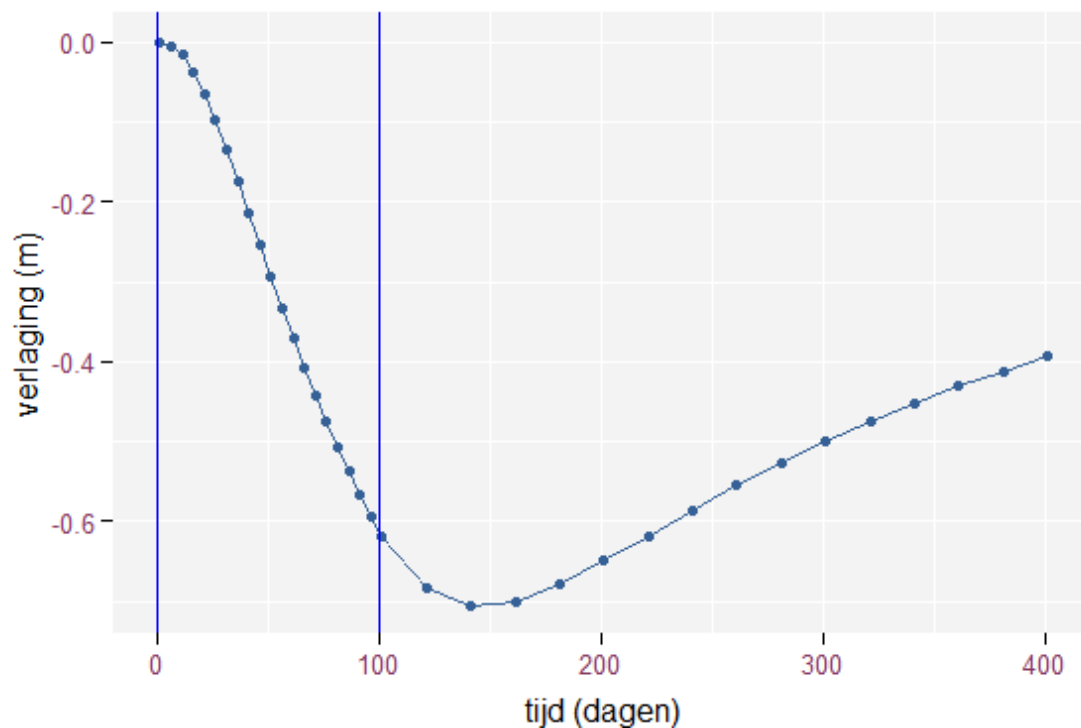
In het voorbeeld is het maximum volume 500 m³/d en worden 5 verticale puntonttrekkingen geplaatst. Uit dit rekenvoorbeeld blijkt dat bij een doorlatendheid van 5 m/d na 17 dagen de 5 cm contour met de formule van Edelman al groter wordt geschat dan met de huidige methode. Bij hogere doorlatendheden wordt dit punt nog sneller bereikt.



Figuur 3.3: Berekende afstand van de 5 cm contour (y-as) in functie van de tijd t (dagen) voor Edelman (dag 1 tot dag 50) en voor Verruijt (horizontale stippellijn)

3.5 Na-ijleffect

In geen van beide benaderingen wordt rekening gehouden met het na-ijleffect. Na het stopzetten van de bemaling kan de verlaging nog iets verder toenemen (Figuur 3.4).



Figuur 3.4: Na-ijleffect bij een bemaling. Grondwaterstand op 100 m van de bemaling. De bemaling start op tijdstip $t=0$, dagen en stopt op tijdstip $t=100$. Ook na de bemaling zet de verlaging nog even (in beperkte mate) door.

3.6 Conclusie

De huidige methode in de voortoets voor lijnbemalingen geeft geen correcte inschatting van de verlaging en wordt best vervangen door de methode van Edelman zoals die uitgewerkt is in het VMM/VLARIO Excel rekeninstrument.

De berekening met de formule van Edelman wordt elders in de voortoets ook al gebruikt (peilverhoging via een gracht) en is dus relatief eenvoudig te implementeren. Met deze methode is het niet meer nodig om het maximale (initiële) debiet en het aantal bemalingsputten in te geven. De gewenste bemalingsdiepte en de duur van de bemaling volstaan.

De maximale lengte van de lijnbemaling wordt best beperkt tot 300 m, conform de aanbevelingen voor het VMM/VLARIO Excel rekeninstrument.

4. Module Bouwputten

4.1 Huidige methode in de voortoets

De voortoets gebruikt voor deze module de formule van Cooper & Jacob (Cooper & Jacob, 1946). De formule is afgeleid van de formule van Theis (Theis, 1935). Het is een benadering voor het bepalen van de invloedstraal bij een bemaling van relatief beperkte duur. De methode werd voorgesteld door VITO (Bronders *et al.*, 2013) en staat o.a. beschreven in De Smedt (2013).

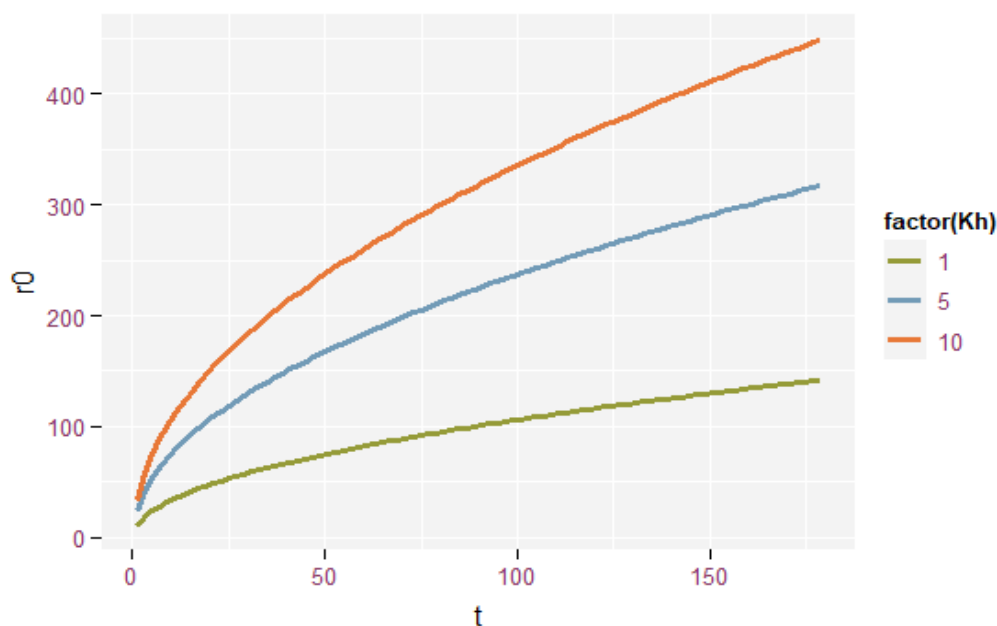
$$r_0 = \sqrt{\frac{2,25 * Kh * D * t}{S}}$$

t = tijd (dagen)

Kh = horizontale doorlatendheid (m/d)

S = porositeit of ook wel berging (m^2/m^2)

Figuur 4.1 geeft de invloedstraal aan bij verschillende doorlatendheden (Kh) tot 180 dagen.



Figuur 4.1: Invloedstraal (r_0 in m) in functie van de tijd (t in dagen) voor drie verschillende doorlatendheden (Kh in m/d). Verzadigde dikte ($D = 20$ m), berging ($S = 0.2$)

Deze formule beschouwt uitsluitend laterale aanvoer van grondwater. De invloedstraal neemt blijvend toe met de tijd. Na langere tijd wordt deze benadering dan ook een overschatting. In werkelijkheid neemt de invloedstraal na een tijd niet meer toe omdat er een evenwicht ontstaat met de andere componenten van de waterbalans (bv. verminderde afvoer naar waterlopen). In de voortoets wordt daarom de tijd beperkt tot maximaal 180 dagen.

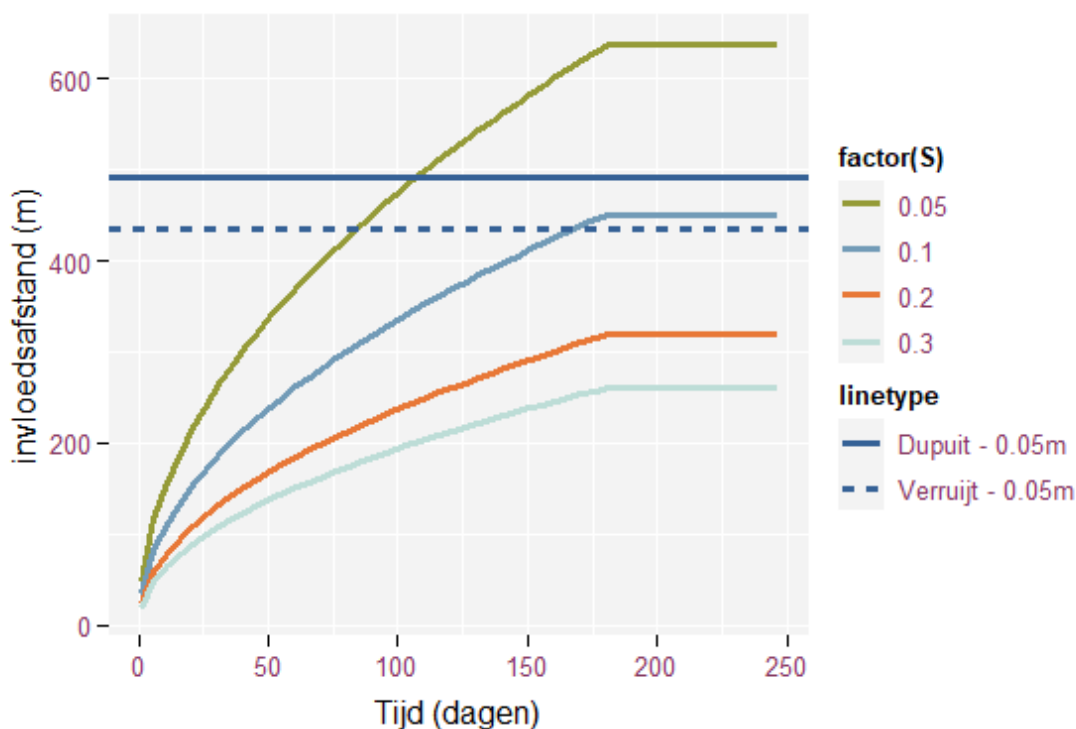
Het voordeel van deze formule is de eenvoud en de flexibiliteit om rekening te houden met de lange of korte duur van de bemaling.

4.2 Vergelijking tussen de methode in de voortoets en de methode Dupuit/Verruijt

Recent biedt de VMM een Excel rekeninstrument aan voor de berekeningen van een bemaling van een bouwput. Deze tool gebruikt de formule van Dupuit (Dupuit, 1857). Dit is een tijdsafhankelijke formule en beschouwt het debiet en de verlaging bij een theoretische evenwichtssituatie.

De methode in de voortoets is tijdsafhankelijk. Daarom is een waarde voor de berging vereist terwijl dit in de formule van Dupuit of Verruijt niet vereist is. We rekenen de methode voor de voortoets uit met uiteenlopende waarden voor de berging (zowel hoog als laag) (0.05, 0.1, 0.2, 0.3).

De methode van Dupuit of Verruijt vereist dan weer een inschatting van de netto neerslag. We kiezen in dit voorbeeld 115 mm/jaar (zie § 7). Ook de diepte van de bemaling moet worden opgegeven.



Figuur 4.2: Vergelijking van de huidige methode in de voortoets met de methode van de VMM Exceltool (Dupuit en Verruijt). Berging $S = 0.1$, diepte bemaling = 4 m, horizontale doorlatendheid 5 m/dag.

Bij een berging van 0.1 en een langlopende bemaling geeft dit rekenvoorbeeld een gelijkaardige invloedsafstand. Het verschil tussen Dupuit en Verruijt is beperkt. De geschatte invloedsafstand hangt sterk af van de berging. Voor bemalingen van minder dan 180 dagen geeft de benadering van de voortoets meestal een kortere invloedsafstand (Figuur 4.2).

4.3 Conclusie

Een belangrijk voordeel van de huidige methode in de voortoets is de eenvoud en het feit dat rekening wordt gehouden met de duur van de bemaling. Voor een relatief lage berging (0.1) en een beperkte diepte van de bemaling (4 m) zijn de resultaten zeer vergelijkbaar. Bij een berging > 0.1 en grotere bemalingsdieptes zou de huidige methode een onderschatting kunnen zijn. Om een onderschatting te vermijden kan de waarde voor de berging beperkt worden (bv. tot 0.1).

De methode van het VMM Excel rekeninstrument is complexer. Onder meer omdat het algoritme iteratieve routines bevat. Voor kortlopende projecten (< 180 dagen) geeft deze aanpak een erg grote verlagingscontour omdat de methode geen rekening houdt met de duur van de bemaling.

De huidige methode van de voortoets zou meer in detail geanalyseerd moeten worden bij uiteenlopende situaties en vergeleken met een tijdsafhankelijke numerieke modellering. Op basis van zo'n vergelijking kan de huidige methode eventueel licht aangepast of enkele beperkingen opgelegd worden (bv. maximale berging, minimale en maximale duur, maximale bemalingsdiepte, ...).

5. Lijnbronnen - peilverlaging via een gracht

De formule om het effect van een peilverlaging of -verhoging in een gracht op de grondwaterstand te berekenen komt overeen met de formule van Edelman die hierboven in paragraaf 3 wordt aanbevolen voor lijnbemalingen. Deze tijdsafhankelijke formule kan gebruikt worden om het effect te schatten van een tijdelijke verhoging of verlaging van het peil in een waterloop op de grondwaterstand in de omgeving.

De formule(s) van Hooghoudt zijn opgesteld voor het ontwerp van drainagesystemen. Zowel open drainage als ondergrondse drainage. De formules berekenen de opbolling tussen de grachten en het debiet in het drainagesysteem. Het zijn tijdsafhankelijke formules en berekenen dus een situatie in evenwicht.

6. Cumulatieve effecten

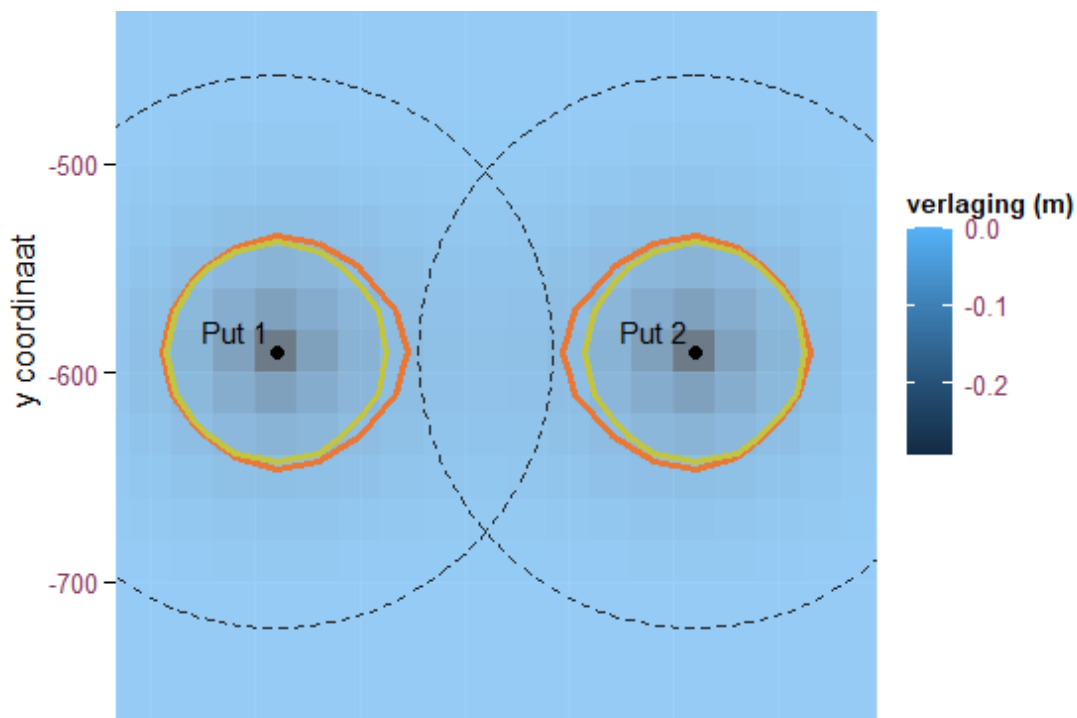
In de hydrologie wordt vaak het 'superpositie principe' toegepast. Het superpositie principe komt erop neer dat de effecten van individuele ingrepen opgeteld kunnen worden (bv. som van de verlaging van twee verschillende puntonttrekkingen uitgezet in een raster). Dit is echter enkel mogelijk in 'lineaire systemen' (bv. in een afgesloten volledig verzadigde watervoerende laag). In een freatische watervoerende laag is er geen lineaire relatie tussen de stijghoogte en de stroming (Reilly *et al.*, 1987) en is de superpositie problematisch. De veranderingen in de verzadigde dikte van de watervoerende laag beïnvloeden de transmissiviteit (verzadigde dikte * doorlatendheid) van de watervoerende laag. Superpositie blijft wel mogelijk wanneer van de grondwaterstand beperkt is ten aanzien van de totale dikte van de verzadigde watervoerende laag (Hemond & Fechner, 2015; Bot, 2011). Niet het aantal onttrekkingen in de omgeving is de beperkende factor, maar het gezamenlijk effect op de transmissiviteit van de watervoerende laag (Edelman, 1972). Reilly *et al.* (1987) geven als vuistregel dat bij een verlaging tot 10% van de verzadigde dikte de superpositie een aanvaardbaar is.

Daarboven is de superpositie niet meer mogelijk en biedt een numerieke modellering een oplossing. Dit kan met een vrij eenvoudig en schematisch model, bv. in MODFLOW (<https://usgs.gov/software/modflow>).

6.1 Rekenvoorbeeld

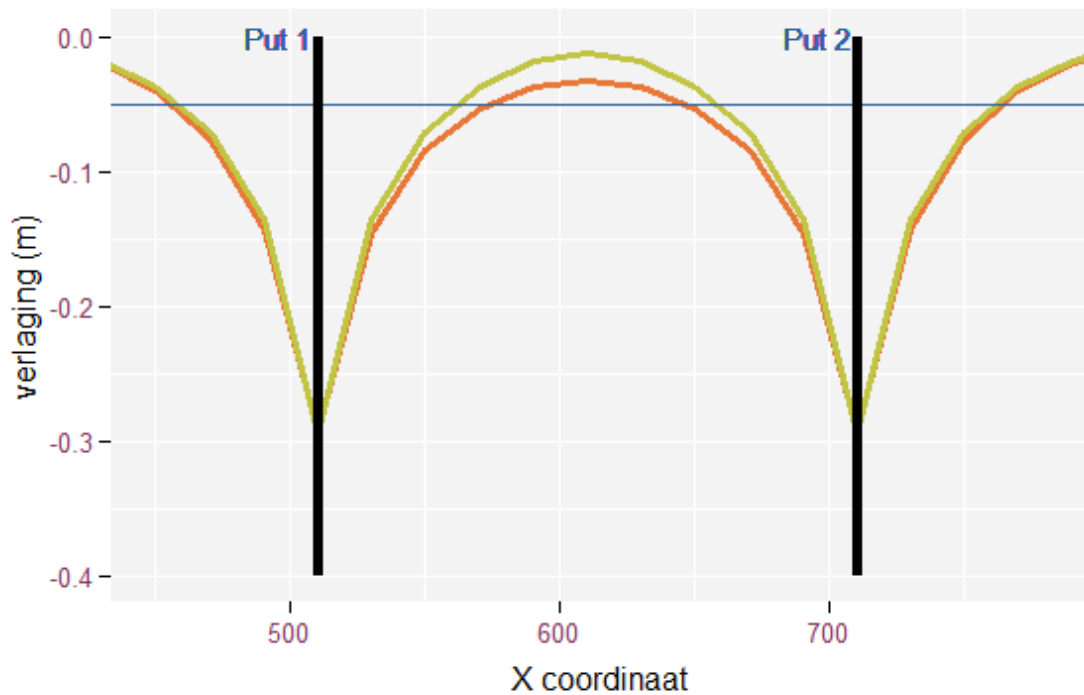
Hieronder een rekenvoorbeeld voor twee relatief beperkte grondwaterwinningen ($15 \text{ m}^3/\text{d}$) uit een freatische watervoerende laag (verzadigde dikte = 5 m, doorlatendheid = 5 m/d, grondwatervoeding uit neerslag = 115 mm/jaar).

In de eerste situatie liggen de twee onttrekkingen op 200 m van elkaar (Figuur 6.1). De berekende invloedsafstand is 132 m. De onttrekkingen beïnvloeden elkaar in beperkte mate. Er is maximaal 60 m overlap. Er is een verschil merkbaar in de contouren (zwart en groen), maar het verschil blijft nog beperkt. De superpositie is hier nog een redelijke goede benadering.



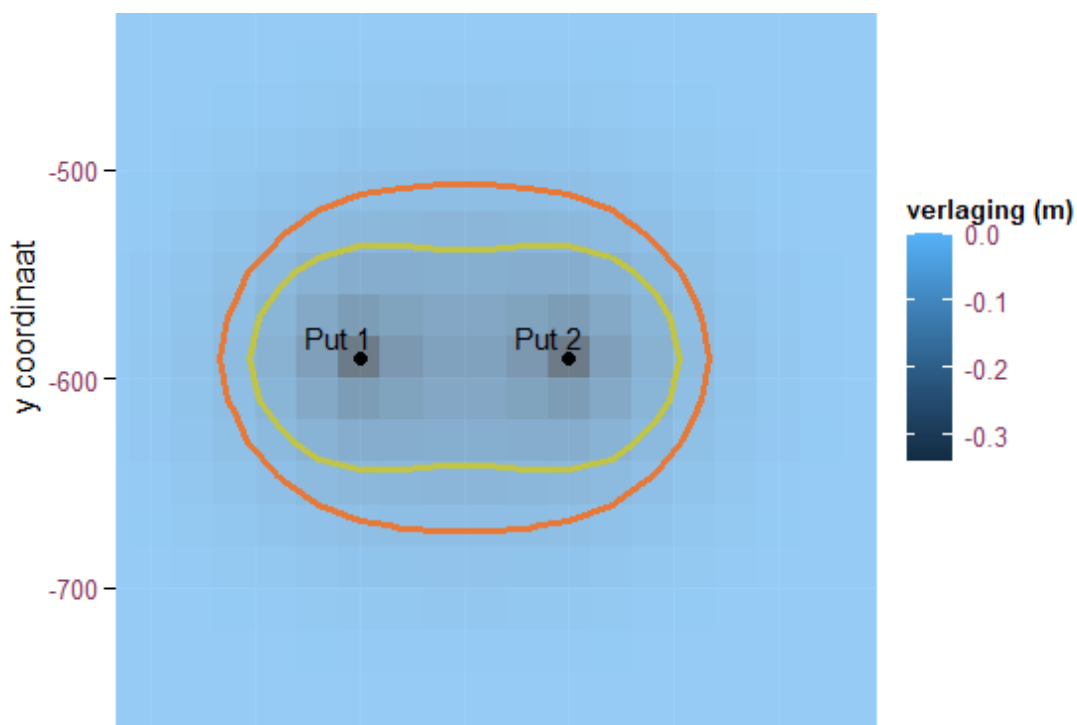
Figuur 6.1: Verlaging (m) bij twee freatische onttrekkingen op 200 m afstand. De contouren geven de 5 cm verlaging weer met: numerieke modellering (oranje), analytisch met superpositie (geel)

Figuur 6.2 geeft dezelfde situatie weer in profiel. In het midden tussen de putten geeft elke onttrekking afzonderlijk een verlaging van slechts 0.6 cm. Superpositie van beide geeft -1.2 cm. Met numerieke modellering is de verlaging al heel wat groter, -3.2 cm.

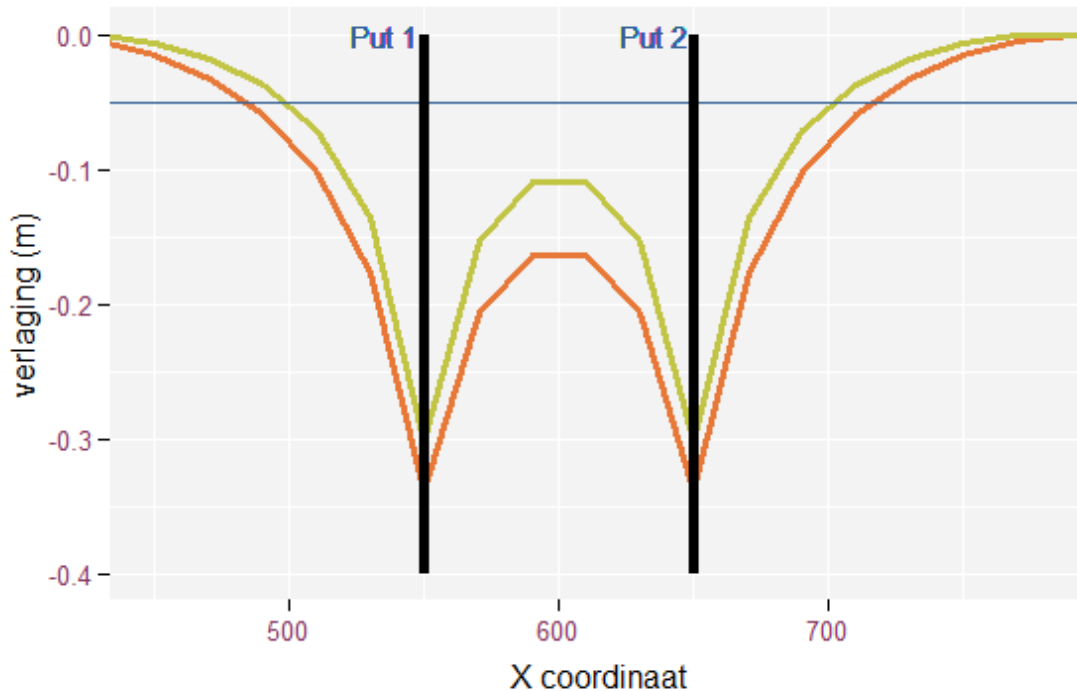


Figuur 6.2: Profiel van de verlaging (m) bij twee freatische onttrekkingen op 200 m afstand met: verlaging volgens het numeriek model (oranje) en analytisch met superpositie (geel)

Wanneer dezelfde winningen op slechts 100 m van elkaar liggen neemt de onderlinge beïnvloeding sterk toe. Er is een duidelijk verschil tussen de superpositie van analytische formules en een numerieke modellering. De superpositie geeft een aanzienlijke onderschatting van de 5 cm contour (figuur 6.3 en figuur 6.4).



Figuur 6.3: Verlaging (m) bij twee freatische onttrekkingen op 100 m afstand. De contouren geven de 5 cm verlaging weer met: numerieke modellering (oranje), analytisch met superpositie (geel)



Figuur 6.4: Profiel van de verlaging (m) bij twee freatische onttrekkingen op 100 m afstand met: verlaging volgens het numeriek model (oranje) en analytisch met superpositie (geel)

6.2 Conclusie

Bij twee of meer puntonttrekkingen moeten de verlagingskegels van alle onttrekkingen opgeteld worden om de totale verlaging te berekenen (superpositie principe).

Voor een freatische watervoerende laag is dit principe van superpositie slechts in beperkte mate toepasbaar. In de literatuur (Edelman, 1972; Reilly *et al.*, 1987) wordt aangegeven dat bij een lokale daling van de verzadigde dikte van meer dan 10% de superpositie niet meer toepasbaar is. Deze 10% regel voor de superpositie is moeilijk als vuistregel in de voortoets te implementeren.

Uit het rekenvoorbeeld blijkt dat voor twee puntonttrekkingen met beperkt overlappende verlagingskegels de superpositiebenadering nog redelijk betrouwbaar is. Naarmate de puntonttrekkingen dichter bij elkaar liggen blijkt de onderschatting van de verlaging met superpositie al snel aanzienlijk ten aanzien van de numerieke modellering.

Een numerieke modellering is te complex en duurt te lang om in de voortoets te implementeren. Als tussenoplossing kan bij de berekening van de verlagingskegel voor elke individuele onttrekking het debiet van de omliggende onttrekkingen toegevoegd worden, proportioneel met de mate van onderlinge overlap van de invloedsafstanden. Hierdoor wordt ruim rekening gehouden met de toegenomen omvang van de verlagingskegel.

Een meer diepgaande studie en gedetailleerde modellering kan eventueel alternatieve vuistregels uitwerken om in de voortoets rekening te houden met cumulatieve effecten.

De bovenstaande conclusies gelden voor het rechtstreeks meetbaar effect van ingrepen op een hypothetisch grondwatersysteem waar initieel geen grondwaterstroming plaatsvindt, waar geen uitwisseling van grondwater is met de omgeving en geen verstoring is omwille van andere ingrepen.

Wanneer in een regio een groot aantal ingrepen worden gecumuleerd, ook al liggen ze buiten elkaars invloedsafstand, heeft dit finaal wel een invloed op de regionale waterbalans. Elke individuele ingreep heeft immers een effect op de waterbalans en de regionale grondwaterstromingen. Om het gezamenlijk effect op regionale schaal te kennen is lokale kennis van de waterhuishouding, de watertransfers, infiltratie- en kwelzones in het gebied vereist.

7. Grondwatervoeding uit neerslag

De voortoets gebruikt de WetSpass-data³. De resolutie (rastergrootte) van de WetSpasskaart is 50 x 50 meter. Vraag is of die data wel geschikt zijn om beoordelingen op puntlocatie uit te voeren.

De waarde van de grondwatervoeding in één rastercel is niet representatief voor de grondwatervoeding uit neerslag in de invloedszone. Best wordt een gemiddelde waarde voor de hele invloedszone gebruikt. Dit kan door de kaart met de grondwatervoeding uit te middelen met een moving average algoritme. Een bijkomende controle is noodzakelijk om extreem hoge of lage waarden voor de grondwatervoeding te vermijden (bijvoorbeeld in de grensgebieden). Dit kan door de minimum- en maximumwaarde van de kaarten te beperken.

Naast de ruimtelijke variatie moet rekening worden gehouden met de jaarlijkse variatie en seizoenale variatie. De jaarlijkse grondwatervoeding geeft een inschatting van de gemiddelde grondwatervoeding. Uit voorzorg wordt voor de grondwatervoeding best een conservatieve (lage) waarde gehanteerd. We stellen voor om een waarde voor de grondwatervoeding te kiezen voor een droog jaar, bijvoorbeeld met een retourperiode van 10 jaar. Dit betekent dat gemiddeld slechts eenmaal om de 10 jaar de grondwatervoeding nog lager is.

³ *WetSpass is een stationair simulatiemodel voor water- en energietransport in bodem, plant en atmosfeer.*

Batelaan *et al.* (2007) schat de grondwatervoeding in Vlaanderen gemiddeld op 220 mm/jaar met een standaardafwijking van 83 mm/jaar. Voor een vrij droog jaar (een retourperiode van 10 jaar) komt dit neer op ongeveer 115 mm/jaar, i.e. ongeveer de helft van het gemiddelde.

$$P(x < 0.1 | \mu = 220, \sigma = 83) = 114$$

De WetSpass-kaart is intussen meer dan een decennium oud. De voortoets moet de potentiële impact inschatten voor nu en in de toekomst. In het licht van de klimaatverandering is het aangewezen de inschatting van de grondwatervoeding op termijn bij te werken of een andere berekeningsmethode te hanteren die rekening houdt met de te verwachten veranderingen in de dynamiek van de grondwatervoeding in Vlaanderen.

De Westspass-kaart met grondwatervoeding is niet specifiek ontwikkeld voor de berekeningen in de voortoets. WetSpass maakt een inschatting van de grondwatervoeding (naast oppervlakkige afvoer en evapotranspiratie) voor een bepaalde uitgangssituatie. Een hoge of lage waarde voor de grondwatervoeding is niet noodzakelijk een goede indicatie voor de mate waarin de grondwatervoeding op een locatie in staat is het onttrokken volume te compenseren. Een hydrologische studie zou een meer gepaste en onderbouwde grondwatervoeding kunnen berekenen die rekening houdt met bovenstaande bedenkingen.

8. Grondwaterstand

Welke diepte van de grondwaterstand het best als worst case wordt genomen hangt af van de effectgroep:

- Bij een puntbron wordt een bepaald debiet onttrokken. Hoe groter de verzadigde dikte, hoe kleiner het verlagende effect. Een verschil van slechts enkele centimeters heeft geen impact op de verlagingskegel. De assumptie van 1 m-mv is hier dus een veilige aanname. Vermits enkel de verlaging ten opzichte van de uitgangssituatie wordt berekend, is de grondwaterstand bij die uitgangssituatie niet belangrijk.
- Bij een bemaling van een bouwput wordt een bepaalde verlaging van de grondwaterstand nagestreefd. Hier geldt hoe groter de verzadigde zone, hoe groter de impact. Voor deze module zou uit voorzorg als uitgangssituatie de grondwaterstand gelijk aan het maaiveld genomen kunnen worden. Ook hier geldt dat een verschil van enkele centimeter in verzadigde dikte geen noemenswaardige impact heeft.
- Verlaging of verhoging via een gracht en drainage buizen. De diepte van de grondwaterstand heeft hier een rechtstreekse invloed op de gewenste verlaging t.o.v. de uitgangssituatie. In deze module zou een betere inschatting van de grondwaterstand nuttig kunnen zijn. Als worst case zou ook hier standaard de grondwaterstand gelijk aan het maaiveld genomen kunnen worden.

De voortoets vraagt bij een bouwput of een lijnbemaling de diepte van de put. De werkelijke bemaling zal bijna altijd dieper zijn (bijvoorbeeld 1 m) om de bodem van de put voldoende droog te houden. Hier wordt best rekening mee gehouden door bijvoorbeeld standaard 1 meter extra toe te voegen.

Indicatieve waarden voor de GHG en GLG per textuur- en drainageklasse.

Gebaseerd op de diepte van roest (indicatief voor GHG) en reductie (indicatief voor GLG) per drainageklasse en de definitie van drainagecomplexen, zoals aangegeven op p. 15 in Van Ranst, E., Sys, C., 2000 ⁽²⁾.

Drainageklasse	Zware texturen		Lichte texturen	
	Textuurklasse: L (zandleem), A (leem), E (klei), U (zware klei), G (stenige gronden)		Textuurklasse: Z (zand), S (lemig zand), P (licht zandleem)	
	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)	GHG (cm-mv)	GLG (cm-mv)
.a.	>125	>125	>120	>125
.b.	>125	>125	90-120	>125
.c.	>80	>125	60-90	>125
.e.	20-50	>80	20-40	>100
.f.	0-20	40-80	0-20	50-100
.g.	0	<40	0	<50
.h.	20-50	>125	20-40	>125
.i.	0-20	>125	0-20	>125
.A.	Van 50 tot >125	>125	Van 40 tot >120	>125
.B.	>125	>125	Van 90 tot >120	>125
.D.	Van 50 tot >80	>125	40-90	>125
.F.	0-50	Van 40 tot >80	0-40	Van 50 tot >100
.G.	0-50	Van 40 tot >125	0-40	Van 50 tot >125
.H.	0-50	Van <40 tot >125	0-40	Van <50 tot >125
.I.	0-50	>125	0-40	>125

De tabel met indicatieve waarde voor de GHG en GLG op basis van de drainageklassen en textuur is weinig bruikbaar. De drainageklassen geven een historische toestand weer die zeer vaak natter is dan de huidige toestand. De GHG en GLG die hieruit worden afgeleid zijn zeer sterk afwijkend van de realiteit (Vande Wauw, 2011). De voortoets maakt een ruwe inschatting en berekent relatieve verlagingen ten opzichte van een uitgangssituatie. De werkelijke grondwaterstand is in dit concept minder belangrijk.

Conclusies

1. **a. In welke mate verschillen de formules van Dupuit en Verruijt? Is het vanuit het worst case perspectief te verantwoorden om periodieke grondwaterwinningen in de voortoets met de formule van Verruijt te beoordelen?**

De formule van Verruijt (huidige formule in de voortoets) is even geschikt als de formule van Dupuit mits de grondwatervoeding uit neerslag voldoende conservatief (laag) wordt gekozen. Omwille van de conformiteit met het Excel rekeninstrument van VMM kan gekozen worden voor de formule van Dupuit.

- b. Implementeren we best een andere formule (bv. Theis) in de voortoets? Wat is de maximale zoekafstand voor de verlagingscontour?**

De formule van Theis is bruikbaar om het effect van periodieke of tijdelijke onttrekkingen in te schatten. Een extra formule betekent echter ook extra complexiteit en vereist bijkomende informatie. Voor langere onttrekkingen geeft de formule een overschatting van de verlaging. Als zou worden overwogen de module uit te breiden voor periodieke of tijdelijke onttrekking is een hydrologische studie aangewezen om na te gaan binnen welke randvoorwaarden de formule van Theis nuttig is. In plaats van een extra formule kan ook de huidige benadering zodanig worden ingesteld dat zowel voor continue als tijdelijke onttrekkingen steeds een worst case wordt berekend.

2. **De voortoets splitst momenteel lijnbemalingen op in diverse puntbemalingen en past vervolgens de formule voor puntbronnen toe. Zijn er grote verschillen met de formule van Edelman en is het eventueel noodzakelijk om over te schakelen?**

De module voor lijnbemaling met verticale drains wordt best aangepast. De huidige methode geeft potentieel een onderschatting van de effecten. Voor deze aanpassingen kan de methode van het VMM/VLARIO Excel rekeninstrument gebruikt worden. De formules voor deze methode worden elders in de voortoets al gebruikt.

3. **Welke formule wordt momenteel in de voortoets gebruikt voor de bemaling van bouwputten? Kunnen we voor deze module best overschakelen op de formule van Dupuit (analoog aan de VMM exceltool)?**

De module voor bouwputten is zeer eenvoudig en heeft als voordeel dat ze rekening houdt met de duur van de bemaling. Bij een beperkte verkenning bleek de formule een realistische inschatting te maken. De voortoets aanpassen aan de methode die het Excel rekeninstrument van VMM gebruikt zal veel extra complex programmeerwerk vereisen. Een beperkte hydrologische studie kan meer in detail analyseren of de huidige module in alle omstandigheden voldoende worst case is. Zo niet is het mogelijk de huidige formule licht aan te passen en/of beperkingen in te bouwen voor sommige variabelen (o.a. porositeit en horizontale doorlatendheid).

4. **Om het effect van een peilverlaging in een gracht op de grondwaterstand te berekenen past de voortoets de formule van Marsily toe. Voor het aanleggen of dempen van een drainage past de voortoets de formule van Hooghoudt toe. Wat is het verschil tussen beide activiteiten?**

De formule van Marsily komt overeen met de formule van Edelman die wordt aanbevolen voor lijnbemalingen. Deze tijdsafhankelijke formule kan gebruikt worden om het effect te schatten van een tijdelijke verhoging of verlaging van het peil in een waterloop op de grondwaterstand in de omgeving.

De formule(s) van Hooghoudt zijn opgesteld voor het ontwerp van drainagesystemen. Zowel open drainage als ondergrondse drainage. Het zijn tijdsafhankelijke formules en berekenen dus een situatie in evenwicht.

5. Kunnen de cumulatieve effecten met analytisch formules correct beoordeeld worden? Kan dan het superpositie principe worden toegepast?

Wanneer meerdere puntonttrekkingen worden ingevoerd geeft de huidige methode potentieel een onderschatting van de verlagingkegel. Het optellen (superpositie) van de verlagingkegels is niet altijd toepasbaar. Bij ingrepen met die elkaar beïnvloeden is de onderschatting door superpositie aanzienlijk en is een numerieke modellering aangewezen. Om een onderschatting van de cumulatieve effecten te vermijden kunnen de volumes van de nabijgelegen onttrekkingen toegevoegd worden, proportioneel met de mate van onderlinge beïnvloeding.

6. De voortoets gebruikt de WetSpass-data. Zijn die data wel geschikt zijn om beoordelingen op puntlocatie uit te voeren?

De waarde van de grondwatervoeding in één rastercel van de WetSpass-kaart is niet representatief voor de grondwatervoeding uit neerslag in de invloedszone. Door van de kaart met de grondwatervoeding een gemiddelde te berekenen voor de ruime omgeving (moving window) worden grote verschillen op korte afstand voldoende uitgemiddeld. Naast de ruimtelijke variatie moet rekening gehouden worden met de temporele variatie. Een gerichte hydrologische studie zou kunnen berekenen welke grondwatervoeding in het kader van de voortoets een redelijke aanname is, rekening houdend met droge periodes in de zomer, de jaarlijkse variatie en de toenemende droge periodes als gevolg van klimaatverandering.

7. Er wordt gerekend met een standaard grondwaterstand van 1 m-mv, is dat voldoende worst case? Zou het niet beter zijn op basis van de geologie een grondwaterstand te definiëren?

Voor de meeste modules heeft de uitgangssituatie voor de grondwaterstand enkel invloed op de verzadigde dikte van de watervoerende laag. Enkele centimeters verschil in de verzadigde dikte hebben vrijwel geen effect op het finale resultaat. Enkel in de modules voor lijnbemaling, verlaging/verhoging via een gracht en drainage zou een meer verfijnde inschatting van de grondwaterstand een meerwaarde kunnen betekenen. De tabel op basis van de drainageklassen is hiervoor weinig bruikbaar.

Referenties

- Batelaan O., Y. Meyus & F. De Smedt. (2007). "De Grondwatervoeding van Vlaanderen." Journal Article. *Congres Watersysteemkennis 2006/2007: Recente Ontwikkelingen in Het Grondwateronderzoek in Vlaanderen*. Water: Tijdschrift over Integraal Waterbeleid 28: 64–71.
- Bot B. (2011). *Grondwaterzakboekje*. Book. Rotterdam, NL: Bot Raadgevend Ingenieur. www.grondwaterzakboekje.nl.
- Bronders J., J. Patyn, I. Van Keer, N. Desmet, J. Vos, W. Peelaerts, L. Decorte & A. Gobin. (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 Optracht van: ANB 2013/RMA/r/120. Book. Mol: VITO.
- Cooper H.H. & C.E. Jacob. (1946). "A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History." Journal Article. *M. Geophys. Union Trans.* 27: 526–34.
- De Smedt F. (2013). *Grondmechanica - Syllabus 2013*. Book. Brussel: VUB - Vrije Universiteit Brussel.
- Dupuit J. (1857). "Mouvement de l'eau a Travers Le Terrains Permeables." Journal Article. *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* 45: 92–96.
- Edelman J.H. (1972). *Groundwater Hydraulics of Extensive Aquifers*. Bulletin 13. Book. Wageningen, Netherlands.: International Institute for Land Reclamation; Improvement (ILRZ).
- EPA. (1994). *Handbook: Ground Water and Wellhead Protection*. EPA/625/r-94/001. Book. US, Washington: EPA.
- Hemond H.F. & E.J. Fechner. (2015). "Chapter 3: The Subsurface Environment." Book Section. In *Chemical Fate and Transport in the Environment*. Academic Press.
- Lebbe L. & A. Vandenbohede. (2004). *Ontwikkeling van Een Lokaal Axi-Symmetrisch Model Op Basis van de HCOV Kartering Ter Ondersteuning van de Adviesverlening Voor Grondwaterwinningen*. Studie in Optracht van AMINAL, Afdeling Water. Book. Gent: UGent.
- Paradis D., R. Martel, G. Karanta, R. Lefebvre, Y. Michaud, R. Therrien & M. Nastev. (2007). "Comparative Study of Methods for WHPA Delineation." Journal Article. *Ground Water* 45 (2): 158–67.
- Reilly T.E., O.L. Franke & G.D. Bennett. (1987). *The Principle of Superposition and Its Application in Ground-Water Hydraulics*. Chapter B6, Book 3. *Applications of Hydraulics*. Book. Washington, US: USGS.
- Thei, 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." Journal Article. *Transactions American Geophysical Union* 16: 519–24.
- Van Daele T. & E. De Bie. (2015). *Leidraad Grondwatermodellering Voor Passende Beoordeling: Onderbouwing Voor Wegwijzer 'Verdroging/Vernatting.'* Vo2014-ANB-PB Verdroging-Vernatting. Book. Interne Rapporten van Het INBO. Brussel: Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek.
- Verruijt A. (1970). *Theory of Groundwater Flow*. Book. London: Macmillan.
- VMM (2020). *Berekeningsinstrument bemaling van een bouwput*. Handleiding. versie 1.0. Aalst, Vlaamse Milieumaatschappij.