

Datum 26 april 2022
Referentie 62164/LL/20220426
Betreft Update opzoekgrafieken bijlage 3.2 BUM BE deel 1 v2.4
Auteur Benno Drijver
Gecontroleerd door Daan Schlieff

1 INLEIDING

Als onderdeel van een voorgenomen update van de BUM Bodemenergie voor provinciale taken (BUM BE deel 1, SIKB) zijn enkele vragen/opmerkingen geplaatst bij bijlage 3.2 - opzoekgrafieken stap 4.a en 4.b van het beslisschema voor de effect-beschouwing bij middelgrote en kleine open bodemenergiesystemen - van de BUM BE deel 1 v2.4 (hierna: BUM). Naar aanleiding van de vragen zijn voor grafiek 3 enkele scenario's doorgerekend om meer inzicht te krijgen in eventuele verschillen tussen de toegepaste benadering en de modelmatig berekende effecten. In deze notitie is dit nader toegelicht en zijn de uitkomsten opgenomen.

2 VRAAGSTELLING

In grafiek 3 kan voor verschillende afstanden tussen de bronnen van een doublet het hydrologisch invloedsgebied van een klein open bodemenergiesysteem worden afgelezen aan de hand van de verhouding tussen het maximale debiet (Q) en het doorlaatvermogen (kD) van de gebruikte watervoerende laag. Het hydrologisch invloedsgebied is de maximale afstand, gemeten vanaf de bronnen, waarbinnen een stijghoogteverandering van 5 cm is berekend. De vraag die is gesteld over grafiek 3 is waarom is gekozen voor de kD van de watervoerende laag in plaats van de kD van het filtertraject. Deze keuze is gemaakt omdat de hydrologische effecten op wat grotere afstand van de bron worden bepaald door de kD van de watervoerende laag en niet meer door de kD van het filtertraject. Op wat grotere afstand van de bronnen maakt het voor de stijghoogteveranderingen dus niet meer uit of het filter over de gehele dikte van de watervoerende laag is geplaatst of slechts over een gedeelte van de dikte: de kD van de watervoerende laag is bepalend. Wanneer zou worden uitgegaan van de kD van het filtertraject, kan dat leiden tot een aanzienlijke overschatting van het hydrologische invloedsgebied, waardoor onnodig vaak alsnog modelberekeningen nodig zijn. Daarom is gekozen voor het gebruik van de kD van de watervoerende laag. Vraag is dan nog wel in hoeverre, als gevolg van de gekozen benadering, juist sprake kan zijn van een onderschatting van de grootte van het hydrologische invloedsgebied. Om die vraag te beantwoorden is een toelichting gegeven op basis van de theorie en zijn enkele modelberekeningen uitgevoerd, om de eventuele verschillen te kwantificeren.

3 THEORIE

In de omgeving van een bronfilter dat over de gehele dikte van een afgesloten watervoerende laag is geplaatst, is alleen sprake van horizontale grondwaterstroming. Als het bronfilter korter is dan de dikte van de watervoerende laag, dan is er op een wat grotere afstand van de bron nog steeds sprake van horizontale stroming. Als het grondwater echter dicht bij de bron komt, dan beginnen de stroombanen af te buigen naar de diepte van het filtertraject. In het gebied waarin er naast de horizontale stroming ook sprake is van verticale stroming zijn de veroorzaakte stijghoogteveranderingen diepte-afhankelijk: ter hoogte van het bronfilter zijn de stijghoogteveranderingen wat groter en op andere dieptes juist wat kleiner. Dicht bij de bron zijn de verschillen het grootst.

Volgens Kruseman en De Ridder (1994) is het verschil tussen de hydrologische effecten van een volledig bronfilter (bronfilter dat over de gehele dikte van de watervoerende laag is geplaatst) en een partieel bronfilter (bronfilter dat slechts over een gedeelte van de dikte van de watervoerende laag is geplaatst) verwaarloosbaar op een afstand van 1,5 à 2 keer de dikte van de watervoerende laag. Dat wil zeggen dat de stroming in de watervoerende laag vrijwel volledig horizontaal is op een afstand gelijk aan 1,5 à 2 keer de dikte van de watervoerende laag. Bij een duidelijke verticale anisotropie neemt deze afstand toe met een factor $\sqrt{k_h/k_v}$. Een voorbeeld:

- De dikte van de watervoerende laag is 80 m
- De doorlatendheid van de watervoerende laag is 40 m/d (Amsterdam/Eindhoven)
- Het debiet is 50 m³/uur (maximaal debiet waarvoor methodiek mag worden gebruikt)
- De afstand tussen de bronnen is 100 m
- Q [m³/uur] / kD [m²/d] is dan dus $50 / (80 \cdot 40) = 0,0156$
- Afgelezen 5 cm invloedsgebied is dan ca. 100 m

Volgens bovenstaande vuistregels is het “partieel effect” bij beperkte verticale anisotropie verwaarloosbaar op (1,5 à 2 keer de dikte van de watervoerende laag = 1,5 à 2 keer 80 m =) 120-160 m afstand en bij een verticale anisotropie van 4 wordt die afstand twee keer zo groot (240-320 m). Het invloedsgebied kan op de diepte van het bronfilter dan dus wat groter zijn dan de zoekgrafieken aangeven. De belangrijkste vragen zijn dan:

- 1) Wat is in deze situatie het berekende invloedsgebied?
- 2) Hoe groot is de berekende invloed op de afgelezen afstand van 100 m?

Lagere doorlatendheid

Als in dezelfde situatie de doorlatendheid wordt verlaagd naar 10 m/d, dan neemt Q [m³/uur] / kD [m²/d] toe met een factor 4 en neemt het afgelezen invloedsgebied toe naar ca. 420 m. Op die afstand zou het “partieel effect” volgens de bovenstaande vuistregels verwaarloosbaar moeten zijn. Bij een doorlatendheid van 20 m/d, is de afgelezen grootte van het invloedsgebied ca. 210 m. Op die afstand zou het “partieel effect” volgens de bovenstaande vuistregels verwaarloosbaar moeten zijn bij beperkte verticale anisotropie en nog enigszins merkbaar bij een verticale anisotropie van 4.

Lager debiet

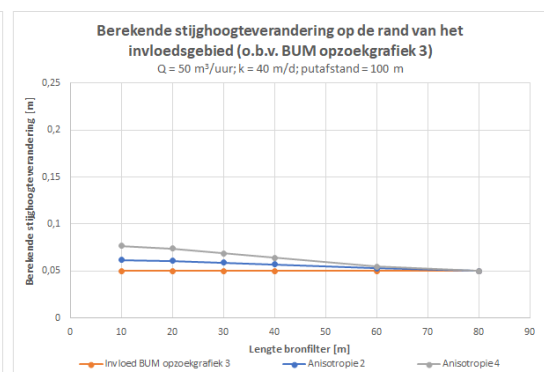
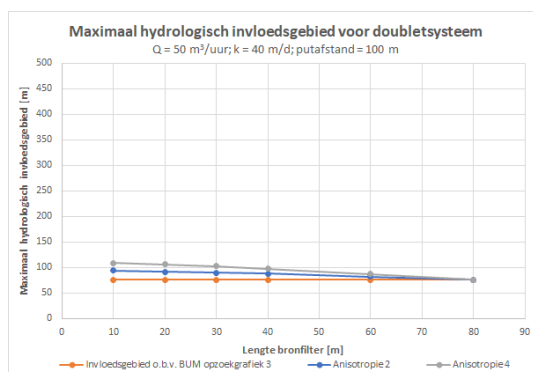
Als het debiet wordt gehalveerd, dan halveert (bij gelijk blijvende kD en bron afstand) ook de verhouding Q [m³/uur] / kD [m²/d] en daardoor halveert ook de grootte van het invloedsgebied. In het eerste voorbeeld gaat het invloedsgebied dan dus naar ongeveer 50 meter. Op die afstand is een grotere invloed van het “partieel effect” te verwachten.

4 MODELBEREKENINGEN

Om een betere indruk te krijgen van de mate waarin het hydrologisch invloedsgebied een onderschatting zou kunnen zijn, zijn berekeningen uitgevoerd voor verschillende situaties met een watervoerende laag met een dikte van 80 meter. Hierbij zijn variaties toegepast in de filterlengte (10, 20, 30, 40, 60 en 80 meter), de verticale anisotropie (2 en 4), de doorlatendheid van de watervoerende laag (10, 20 en 40 m/d) en het debiet (20 en 50 m³/uur). De uitkomsten van de berekeningen zijn in onderstaande tabellen en grafieken weergegeven.

Scenario 1: 50 m ³ /uur; 40 m/d; 100 m afstand; anisotropie 2					
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	[m]
laag 1-5	12,5%	10	94	76	0,062
laag 1-10	25,0%	20	92	76	0,061
laag 1-15	37,5%	30	90	76	0,059
laag 1-20	50,0%	40	88	76	0,057
laag 1-30	75,0%	60	82	76	0,053
laag 1-40	100,0%	80	76	76	0,05

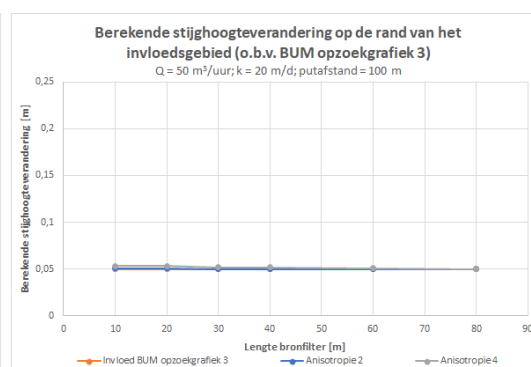
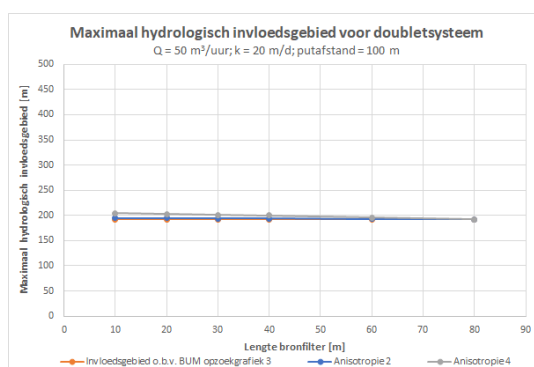
Scenario 2: 50 m ³ /uur; 40 m/d; 100 m afstand; anisotropie 4					
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	[m]
laag 1-5	12,5%	10	109	76	0,077
laag 1-10	25,0%	20	106	76	0,074
laag 1-15	37,5%	30	103	76	0,069
laag 1-20	50,0%	40	98	76	0,064
laag 1-30	75,0%	60	87	76	0,055
laag 1-40	100,0%	80	76	76	0,05



Scenario 1 en 2 betreffen berekeningen met een debiet van 50 m³/uur, een doorlatendheid van 40 m/d en een afstand van 100 m tussen de bronnen. Er zijn berekeningen uitgevoerd voor verschillende filterlengtes en verticale anisotropie waarden. Bovenstaande tabellen en grafieken laten zien dat bij een filterlengte van 80 m de resultaten, zoals verwacht, exact overeen komen met de opzoekgrafieken. Bij kortere filterlengtes ontstaan verschillen en die verschillen zijn, zoals verwacht, het grootst bij een combinatie van een korte filterlengte en een wat hogere waarde voor de verticale anisotropie. De met het model berekende stijghoogteverandering op de afstand die is afgelezen in de opzoekgrafiek (rand van het hydrologische invloedsgebied volgens de opzoekgrafiek) is in het meest extreme geval 0,08 m in plaats van 0,05 m.

Scenario 3: 50 m ³ /uur; 20 m/d; 100 m afstand; anisotropie 2					
MLU model	Bronfilter	Invoedsgebied berekend	Invoedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	195	192	0,051
laag 1-10	25,0%	20	195	192	0,051
laag 1-15	37,5%	30	194	192	0,05
laag 1-20	50,0%	40	194	192	0,05
laag 1-30	75,0%	60	193	192	0,05
laag 1-40	100,0%	80	192	192	0,05

Scenario 4: 50 m ³ /uur; 20 m/d; 100 m afstand; anisotropie 4					
MLU model	Bronfilter	Invoedsgebied berekend	Invoedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	204	192	0,053
laag 1-10	25,0%	20	203	192	0,053
laag 1-15	37,5%	30	201	192	0,052
laag 1-20	50,0%	40	200	192	0,052
laag 1-30	75,0%	60	196	192	0,051
laag 1-40	100,0%	80	192	192	0,05

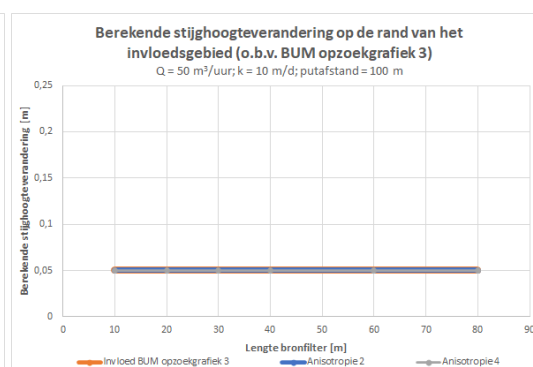
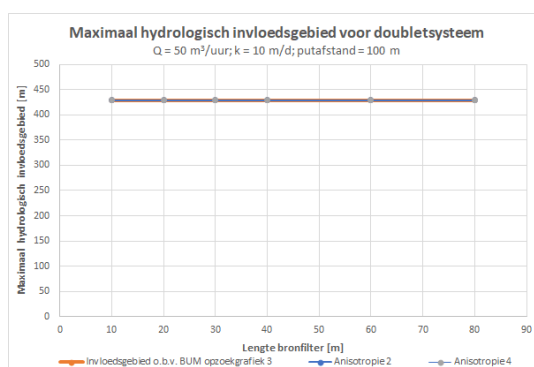


Scenario 3 en 4 betreffen dezelfde berekeningen als scenario 1 en 2, maar nu met een doorlatendheid van 20 m/d in plaats van 40 m/d. In dit geval is het hydrologische invloedsgebied groter dan in scenario 1 en 2, als gevolg van het lagere doorlaatvermogen. De verschillen tussen de opzoekgrafieken en de berekeningen zijn in dit geval veel kleiner, omdat het invloedsgebied verder van de bronnen reikt (waar het verschil tussen een kort of een lang bronfilter nog maar nauwelijks merkbaar is).

Ook hier komen de resultaten bij een filterlengte van 80 m exact overeen met de opzoekgrafieken. De berekende stijghoogteverandering op de afstand die is afgelezen in de opzoekgrafiek (rand van het hydrologische invloedsgebied volgens de opzoekgrafiek) is in het meest extreme geval 0,053 m in plaats van 0,050 m.

Scenario 5: 50 m ³ /uur; 10 m/d; 100 m afstand; anisotropie 2					
MLU model	Bronfilter	Invoedsgebied berekend	Invoedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	429	429	0,05
laag 1-10	25,0%	20	429	429	0,05
laag 1-15	37,5%	30	429	429	0,05
laag 1-20	50,0%	40	429	429	0,05
laag 1-30	75,0%	60	429	429	0,05
laag 1-40	100,0%	80	429	429	0,05

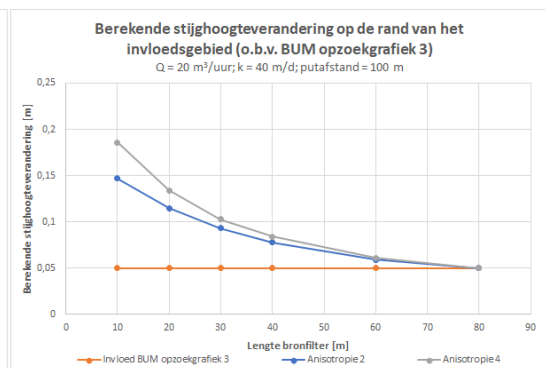
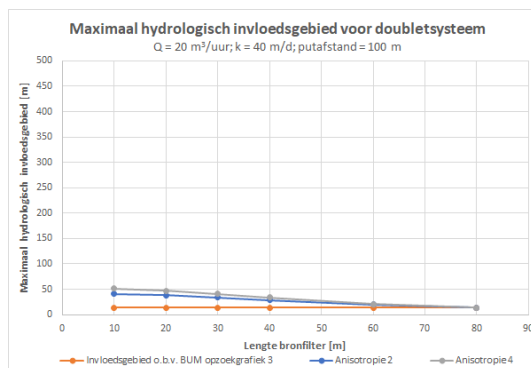
Scenario 6: 50 m ³ /uur; 10 m/d; 100 m afstand; anisotropie 4					
MLU model	Bronfilter	Invoedsgebied berekend	Invoedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	429	429	0,05
laag 1-10	25,0%	20	429	429	0,05
laag 1-15	37,5%	30	429	429	0,05
laag 1-20	50,0%	40	429	429	0,05
laag 1-30	75,0%	60	429	429	0,05
laag 1-40	100,0%	80	429	429	0,05



In scenario 5 en 6 is de doorlatendheid nog wat verder verlaagd ten opzichte van de doorlatendheid in scenario 3 en 4. Dit betreffen berekeningen met een debiet van 50 m³/uur, een doorlatendheid van 10 m/d en een afstand van 100 m tussen de bronnen. Ook hier zijn berekeningen uitgevoerd voor verschillende filterlengtes en verticale anisotropie waarden. In dit geval is het hydrologische invloedsgebied, door het lagere doorlaatvermogen, aanzienlijk groter dan in de scenario's 1 tot en met 4. In dit geval zijn er geen verschillen tussen de opzoekgrafieken en de berekeningen. Het invloedsgebied reikt nu zo ver van de bronnen dat de filterlengte en de anisotropie geen verschil meer maken. De met het model berekende stijghoogteverandering op de afstand die is afgelezen in de opzoekgrafiek (rand van het hydrologische invloedsgebied volgens de opzoekgrafiek) is 0,050 m en dus gelijk aan de stijghoogteverandering waarop de opzoekgrafiek is gericht.

Scenario 7: 20 m ³ /uur; 40 m/d; 100 m afstand; anisotropie 2					
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	41	14	0,147
laag 1-10	25,0%	20	38	14	0,115
laag 1-15	37,5%	30	34	14	0,093
laag 1-20	50,0%	40	29	14	0,078
laag 1-30	75,0%	60	20	14	0,059
laag 1-40	100,0%	80	14	14	0,05

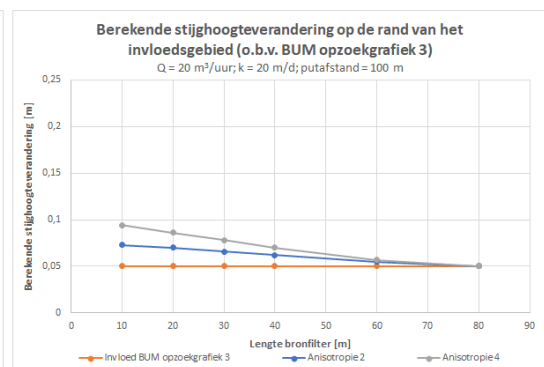
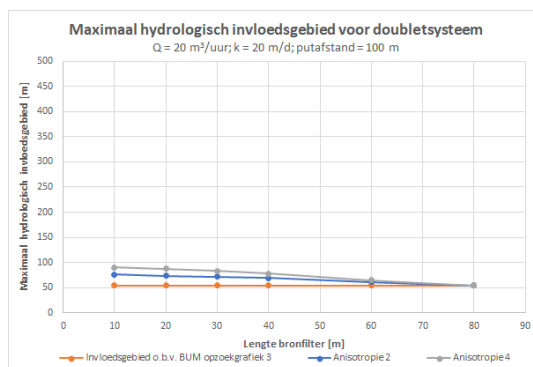
Scenario 8: 20 m ³ /uur; 40 m/d; 100 m afstand; anisotropie 4					
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	51	14	0,186
laag 1-10	25,0%	20	47	14	0,134
laag 1-15	37,5%	30	41	14	0,103
laag 1-20	50,0%	40	34	14	0,084
laag 1-30	75,0%	60	21	14	0,061
laag 1-40	100,0%	80	14	14	0,05



Scenario 7 en 8 zijn grotendeels gelijk aan scenario 1 en 2: alleen het debiet is aangepast van 50 m³/uur naar 20 m³/uur. Door het lage debiet is het hydrologische invloedsgebied volgens de opzoekgrafieken zeer klein (14 m vanaf de bronnen). Op zo'n korte afstand van de bronnen is de invloed van verticale stroming rond korte bronfilters relatief groot. Het invloedsgebied is in dit geval dan ook groter dan de opzoekgrafieken aangeven: in het meest extreme geval 51 meter in plaats van 14 meter. Ook de berekende stijghoogteverandering op de afstand die is afgelezen in de opzoekgrafiek (rand van het hydrologische invloedsgebied volgens de opzoekgrafiek: dus op 14 m afstand van de bronnen) is duidelijk groter: in het meest extreme geval 0,186 m in plaats van 0,050 m. De verschillen zijn hier dus relatief groot, maar de bijbehorende invloedsgebieden zijn in dit geval klein.

Scenario 9: 20 m ³ /uur; 20 m/d; 100 m afstand; anisotropie 2					
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	76	54	0,073
laag 1-10	25,0%	20	74	54	0,07
laag 1-15	37,5%	30	72	54	0,066
laag 1-20	50,0%	40	69	54	0,062
laag 1-30	75,0%	60	61	54	0,055
laag 1-40	100,0%	80	54	54	0,05

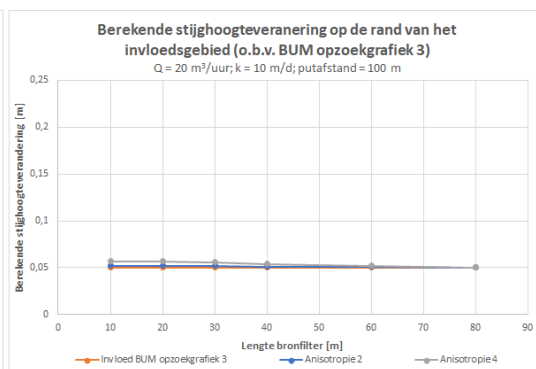
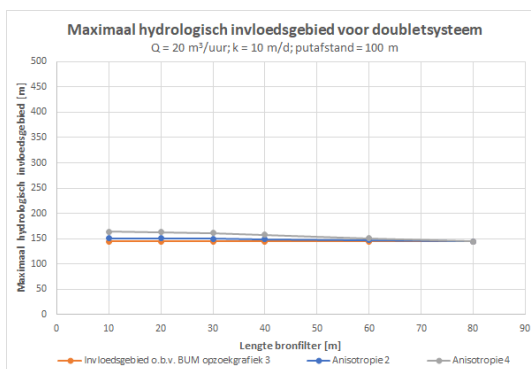
Scenario 10: 20 m ³ /uur; 20 m/d; 100 m afstand; anisotropie 4					
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken	
	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	90	54	0,094
laag 1-10	25,0%	20	88	54	0,086
laag 1-15	37,5%	30	83	54	0,078
laag 1-20	50,0%	40	78	54	0,07
laag 1-30	75,0%	60	65	54	0,057
laag 1-40	100,0%	80	54	54	0,05



Scenario 9 en 10 zijn grotendeels gelijk aan scenario 3 en 4: alleen het debiet is aangepast van 50 m³/uur naar 20 m³/uur. Ten opzichte van scenario 7 en 8 is de doorlatendheid verlaagd van 40 m/d naar 20 m/d. Door de lagere doorlatendheid is het hydrologische invloedsgebied volgens de opzoekgrafieken duidelijk groter dan in scenario 7 en 8, maar nog steeds relatief klein (54 m vanaf de bronnen). Doordat het invloedsgebied verder van de bronnen reikt, zijn de verschillen tussen de opzoekgrafieken en de modelberekeningen kleiner dan bij scenario 7 en 8.

Scenario 11: 20 m ³ /uur; 10 m/d; 100 m afstand; anisotropie 2						
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken		
	80	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	151	145	0,052	
laag 1-10	25,0%	20	151	145	0,052	
laag 1-15	37,5%	30	150	145	0,052	
laag 1-20	50,0%	40	149	145	0,051	
laag 1-30	75,0%	60	147	145	0,051	
laag 1-40	100,0%	80	145	145	0,05	

Scenario 12: 20 m ³ /uur; 10 m/d; 100 m afstand; anisotropie 4						
MLU model	Bronfilter	Invloedsgebied berekend	Invloedsgebied o.b.v. opzoekgrafieken	Stijghoogteverandering o.b.v. afstand opzoekgrafieken		
	80	[m]	laag 1 [m]	[m]	[m]	
laag 1-5	12,5%	10	164	145	0,057	
laag 1-10	25,0%	20	163	145	0,057	
laag 1-15	37,5%	30	161	145	0,056	
laag 1-20	50,0%	40	158	145	0,054	
laag 1-30	75,0%	60	151	145	0,052	
laag 1-40	100,0%	80	145	145	0,05	

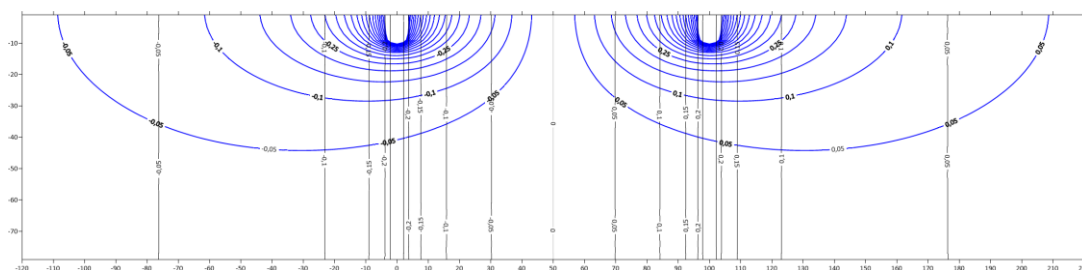


In scenario 11 en 12 is de doorlatendheid ten opzichte van scenario 9 en 10 nog verder verlaagd naar 10 m/d. Daardoor is het hydrologische invloedsgebied volgens de opzoekgrafieken duidelijk groter en zijn de verschillen tussen de opzoekgrafieken en de modelberekeningen nog maar klein.

5 CONCLUSIE

Geconcludeerd wordt dat de opzoekgrafieken over het algemeen een goede voorspelling doen van de grootte van het hydrologische invloedsgebied. Wanneer het invloedsgebied volgens de opzoekgrafieken klein is, kan het invloedsgebied echter wat groter zijn dan de opzoekgrafieken aangeven. Dit verschil wordt veroorzaakt door het afbuigen van de stroombanen (van horizontaal naar schuin omhoog of schuin omlaag) in de directe omgeving van korte bronfilters in een dikke watervoerende laag.

Opgemerkt wordt dat de hydrologische effecten op zeer korte afstand van een open bodemenergiesysteem, afhankelijk van de diepte van het bronfilter en de diepte van het bestaande belang dat mogelijk wordt beïnvloed, zowel groter als kleiner kunnen zijn dan de opzoekgrafieken aangeven. Dit is visueel inzichtelijk gemaakt in de onderstaande verticale dwarsdoorsnede. In de dwarsdoorsnede, met de resultaten van de berekeningen van scenario 2 (die relatief grote verschillen laat zien), zijn de berekende stijghoogteveranderingen weergegeven die horen bij een systeem met bronfilters over de volledige dikte van de watervoerende laag (lengte bronfilters 80 m: zwarte contouren) en de stijghoogteveranderingen die zijn berekend voor een systeem met veel kortere bronfilters in de top van dezelfde watervoerende laag (lengte bronfilters 10 m: blauwe contouren). Uit de figuur blijkt, dat de berekende stijghoogteveranderingen van het systeem met de korte filterlengte - ter hoogte van de zwarte 5 cm contour - groter zijn in het bovenste deel van de watervoerende laag en kleiner in het onderste deel.



LITERATUUR

Kruseman, G.P. and De Ridder, N.A. (1994). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data - Second Edition. ILRI publication 47, Wageningen, The Netherlands.