

Bijlage 3. Effect-beschouwing bij middelgrote en kleine open bodemenergiesystemen

Dit is een bijlage bij § 3.3.1.

Voor de beoordeling van de ontvankelijkheid van de vergunningaanvraag (uitgewerkt onder W2 in de toetslijst in § 3.3.1) is een differentiatie aangebracht tussen:

- open bodemenergiesystemen met een debiet tot 50 m³/uur en tot 250.000 m³/jaar, met bovenkant van de bronfilters dieper dan 20 meter beneden maaiveld;
- overige systemen.

Deze bijlage beschrijft de vereenvoudigde indieningsvereisten voor de effectbeschouwing bij de eerstgenoemde categorie van open bodemenergiesystemen (verder 'kleine en middelgrote systemen' genoemd).

In Provincie Gelderland zijn deze vereenvoudigde indieningsvereisten voor de effect-beschouwing bij kleine en middelgrote systemen niet standaard van toepassing. Dit vanwege de complexe bodemopbouw in grote delen van Gelderland. Zie toelichting in § 3.3.

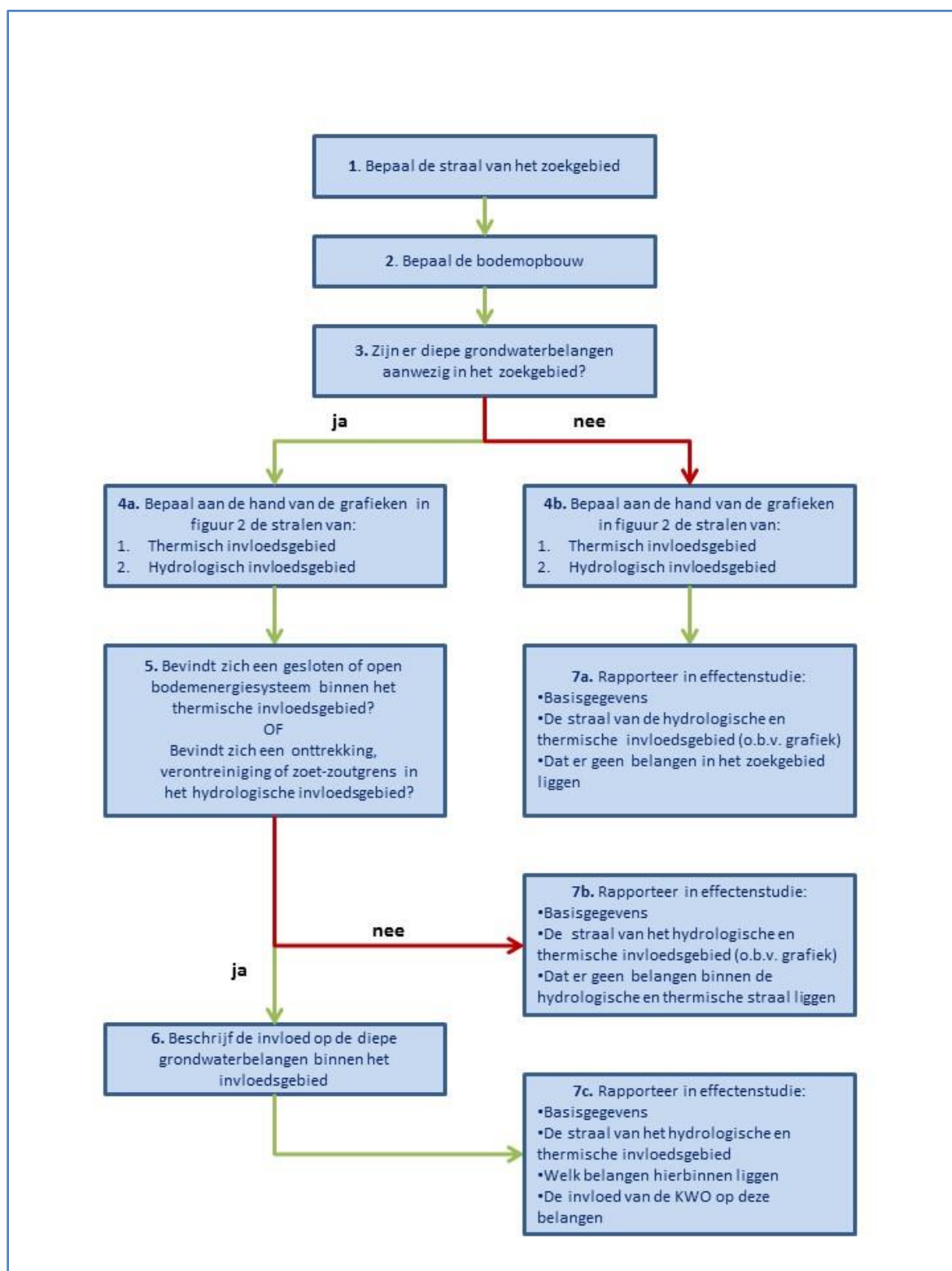
Bijlage 3.1 geeft het beslisschema voor de inhoud en opzet van de effect-beschouwing bij kleine en middelgrote open bodemenergiesystemen.

Bijlage 3.2 bevat opzoekgrafieken waarmee de straal van het hydrologisch en van het thermisch invloedsgebied wordt bepaald.

Als tussenstap wordt hierbij de verlaging en verhoging van de stijghoogte in de bronnen afgelezen uit de opzoekgrafieken in bijlage 4.2. De informatie over de verandering van de stijghoogte in de bronnen moet ook aan het bevoegd gezag worden aangeleverd.

Bijlage 3.3 geeft een sjabloon voor de rapportage van de effect-beschouwing bij 'kleine en middelgrote' open bodemenergiesystemen.

Bijlage 3.1. Beslisschema effect-beschouwing bij open bodemenergiesystemen met een debiet tot 50 m³/uur.



Toelichting beslisschema

Ad 1:

Bepaal het zoekgebied via berekening van de straal van het zoekgebied (vanaf het middelpunt van de bronnen, in meters) van het beoogde systeem met de formule: $250 + 0,5 L$.

Hierbij is L:

- de hart-tot-hart afstand tussen de koude en warme bron, of
- de afstand van het middelpunt van het cluster van koude bronnen en het middelpunt van het cluster van warme bronnen van een bodemenergiesysteem. Een cluster bronnen bestaat uit alleen koude bronnen of alleen warme bronnen, welke zo dicht bij elkaar staan dat ze één thermische bel vormen.

Ad 2:

Bepaal de bodemopbouw op basis van het geohydrologische model NHI. Als alternatief kan gebruik worden gemaakt van informatie uit Regis of van (een) nabijgelegen boring(en).

Ad 3:

Diepe grondwaterbelangen binnen het zoekgebied zijn:

- mobiele verontreinigingen dieper dan 10 meter;
- grondwateronttrekkingen waarbij het filter dieper dan 10 meter zit;
- zoet-zoutgrensvlak in het opslagpakket;
- open bodemenergiesysteem in het opslagpakket;
- gesloten bodemenergiesysteem in het opslagpakket.

Aanvullend daaraan worden als diepe grondwaterbelangen betrokken bij de vervolgstappen:

- open bodemenergiesystemen in het opslagpakket, met een vergund onttrekkingsdebiet van meer dan 1.000.000 m³/jaar, tot een afstand van 500 meter vanaf het middelpunt van de bronnen van het nieuwe systeem.

Ad 4a en 4b:

De stralen van deze invloedsgebieden worden afgeleid met behulp van de grafieken in bijlage 3.2 van deze BUM.

Ad 5:

- Als het antwoord op één van de twee vragen 'ja' is: doorgaan via de pijl 'ja'.
- Als het antwoord op beide vragen 'nee' is: doorgaan via de pijl 'nee'.

Ad 6:

Alleen de invloed op de diepe grondwaterbelangen in kaart brengen die binnen het bij stap 4.a bepaalde invloedsgebied liggen.

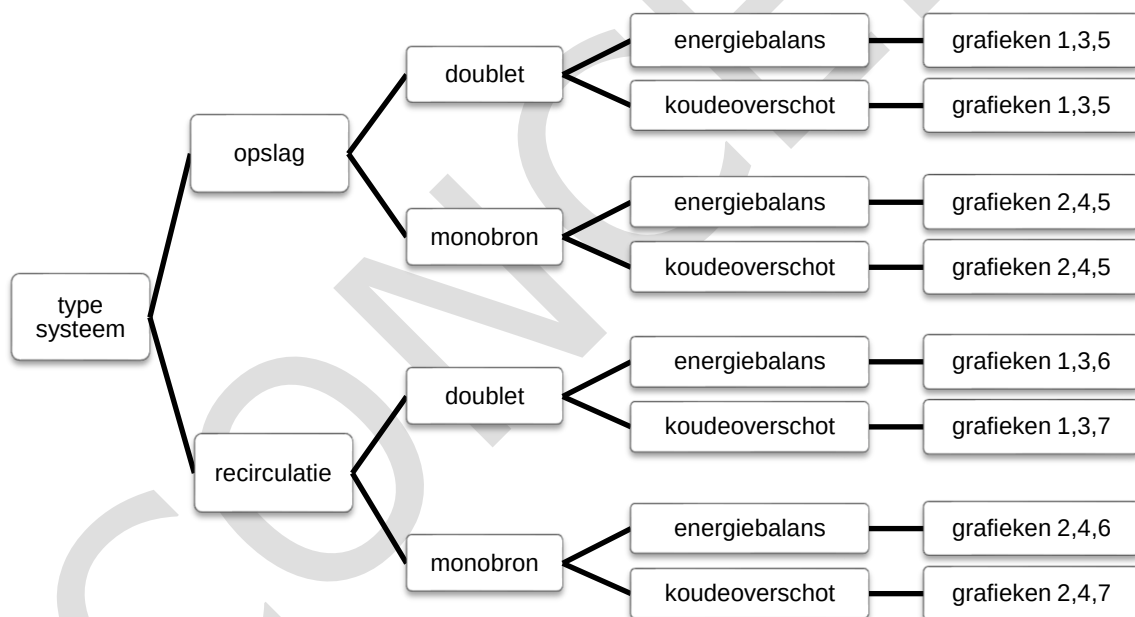
Bijlage 3.2. Opzoekgrafieken stap 4.a en 4.b van beslisschema

Bij stap 4.a en 4.b van het beslisschema in bijlage 3.1 wordt het hydrologische en thermische invloedsgebied bepaald voor een klein of middelgroot open bodemenergiesysteem. Dit vindt plaats aan de hand van opzoekgrafieken. Deze bijlage presenteert de opzoekgrafieken en beschrijft hoe men deze grafieken gebruikt.

Deze bijlage bevat de volgende 7 grafieken:

- Grafiek 1: Maximale verlaging dan wel verhoging van de stijghoogte in de bron voor doubletsystemen (opslag en recirculatie).
- Grafiek 2: Maximale verlaging dan wel verhoging van de stijghoogte in de bron voor monobronsystemen (opslag en recirculatie).
- Grafiek 3: Hydrologisch invloedsgebied voor doubletsystemen (opslag en recirculatie).
- Grafiek 4: Hydrologisch invloedsgebied voor monobronsystemen (opslag en recirculatie).
- Grafiek 5: Thermisch invloedsgebied voor opslagsystemen (doublet en monobron) met energiebalans en een koudeoverschot (in de ondergrond).
- Grafiek 6: Thermisch invloedsgebied voor recirculatiesystemen (doublet en monobron) met energiebalans (in de ondergrond).
- Grafiek 7: Thermisch invloedsgebied voor recirculatiesystemen (doublet en monobron) met een koudeoverschot (in de ondergrond).

Aan de hand van de kenmerken van het bodemenergiesysteem kan met behulp van het onderstaande stroomschema worden bepaald welke grafieken van toepassing zijn.

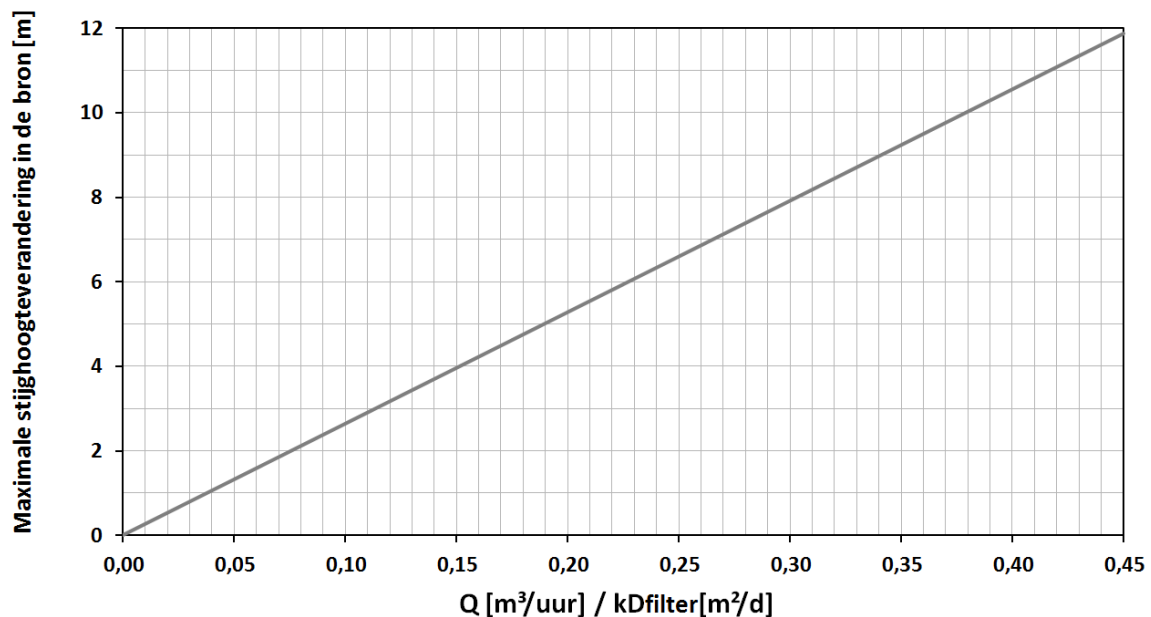


Toepassing van de grafieken

De bodemparameters die gebruikt worden bij de toepassing van de grafieken worden ontleend aan het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI), REGIS of boorbeschrijvingen van eerder uitgevoerde nabij gelegen boringen.

Wanneer het aan te vragen systeem buiten het bereik van de x-as van de grafieken valt, zijn de bodem- of ontwerpparameters erg uitzonderlijk en kan geen waarde worden afgelezen. Wanneer een systeem buiten een grafiek valt, kan het bevoegd gezag beslissen dat het noodzakelijk is om extra onderbouwing of berekeningen aan te leveren. In dergelijke gevallen dient contact te worden opgenomen met het bevoegd gezag om te bezien wat het vereiste vervolgtraject is.

Grafiek 1. Maximale verlaging dan wel verhoging van de stijghoogte in de bron voor doubletsystemen (opslag en recirculatie)



Gebruik van de grafiek

De maximale stijghoogteverandering in de bron wordt afgelezen uit grafiek 1. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende parameters:

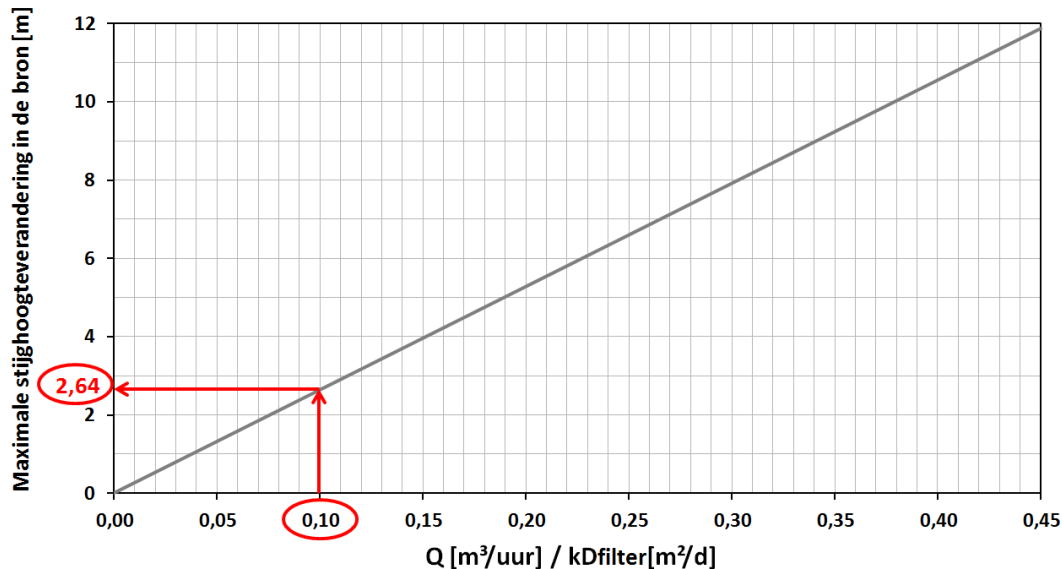
- het maximale debiet Q in [m³/uur]
- het doorlaatvermogen ter hoogte van het filtertraject, kD_{filter} , [m²/dag]
- de filterlengte H [m]

Het maximale debiet (Q) wordt gedeeld door het doorlaatvermogen ter hoogte van het filter (kD_{filter}). Het getal dat hier uitkomt, is de waarde op de x-as. De maximale stijghoogteverandering in de bron is af te lezen op de y-as.

$$kD_{\text{filter}} = kD_{\text{pakket}} / \text{dikte pakket} * H$$

Voorbeeld:

Het maximale debiet van een systeem is 40 m³/uur. De waarde voor kD_{filter} wordt bepaald door de kD van het watervoerende pakket te delen door de dikte van het pakket en te vermenigvuldigen met de filterlengte (H). Het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket bedraagt 800 m²/dag en het pakket heeft een dikte van 40 meter. De bronnen hebben een filterlengte van 20 meter. Het doorlaatvermogen ter hoogte van het filtertraject is dus $800 / 40 \cdot 20 = 400$ m²/dag. Het getal op de x-as is dan $40 / 400 = 0,10$. De verlaging in de bron is hiermee circa 2,6 m.



Onderbouwing en aannames bij de grafiek

De analytische oplossing voor een opslagsysteem komt overeen met de analytische oplossing voor spiegelputten. Deze analytische oplossingen zijn ontwikkeld voor putten nabij een lineaire structuur die zorgt voor een vaste stijghoogte in het gebruikte watervoerende pakket (bijv. een rivier of een meer waarvan de bedding tot in het watervoerende pakket reikt en waarvan het peil niet wordt beïnvloed door de onttrekking in de put). Midden tussen de bronnen is de invloed van het onttrekkingsfilter gelijk aan de invloed van het infiltratiefilter, waardoor de stijghoogte ter plaatse niet verandert. De veranderingen aan beide zijden van dit punt zijn exact gelijk, maar tegengesteld. De analytische oplossing is als volgt ([zie b.v. Fitts \(2002\). Groundwater Science. Academic Press/Elsevier](#)):

$$dh = \frac{Q}{2\pi k D_{\text{filter}} D} \ln \left(\frac{r_{12}}{r_{12}} \right)$$

Waarbij:

dh = stijghoogteverandering [m].

Q = debiet waarmee grondwater wordt onttrokken en geïnfiltreerd [m³/dag].

kD_{filter} = doorlaatvermogen ter hoogte van het filtertraject doorlatendheid van het watervoerende pakket [m²/dag]

D = dikte van het watervoerende pakket [m]

r_1 = afstand van de put waarvan de stijghoogte wordt berekend tot het middelpunt van de -onttrekkingsput (in dit geval gelijk aan de boorgatstraal) [m]

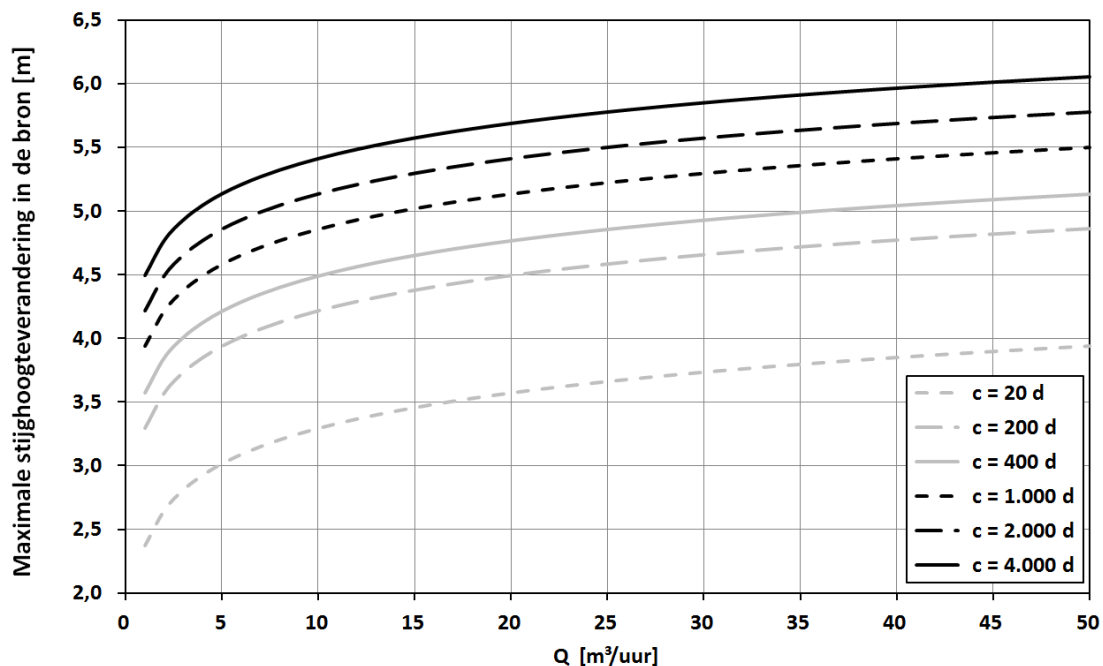
r_2 = afstand van de put waarvan de stijghoogte wordt berekend tot het middelpunt -van de infiltratieput (in dit geval gelijk aan de afstand tussen de putten) [m]

Aannames

De volgende aannames zijn gedaan:

- De boordiameter is 0,4 m ($r_1 = 0,2$ m); dit is een relatief kleine diameter (worst-case benadering).
- De bronafstand is 200 m ($r_2 = 200$ m); dit is een relatief grote afstand (worst-case benadering).

Grafiek 2. Maximale verlaging dan wel verhoging van de stijghoogte in de bron voor monobronsystemen (opslag en recirculatie)



Gebruik van de grafiek

De maximale stijghoogteverandering in de monobron wordt afgelezen uit grafiek. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende parameters:

- het maximale debiet in m³ per uur, Q [m³/uur]
- de weerstand van de bodemlagen tussen de bronfilters, c [dagen]

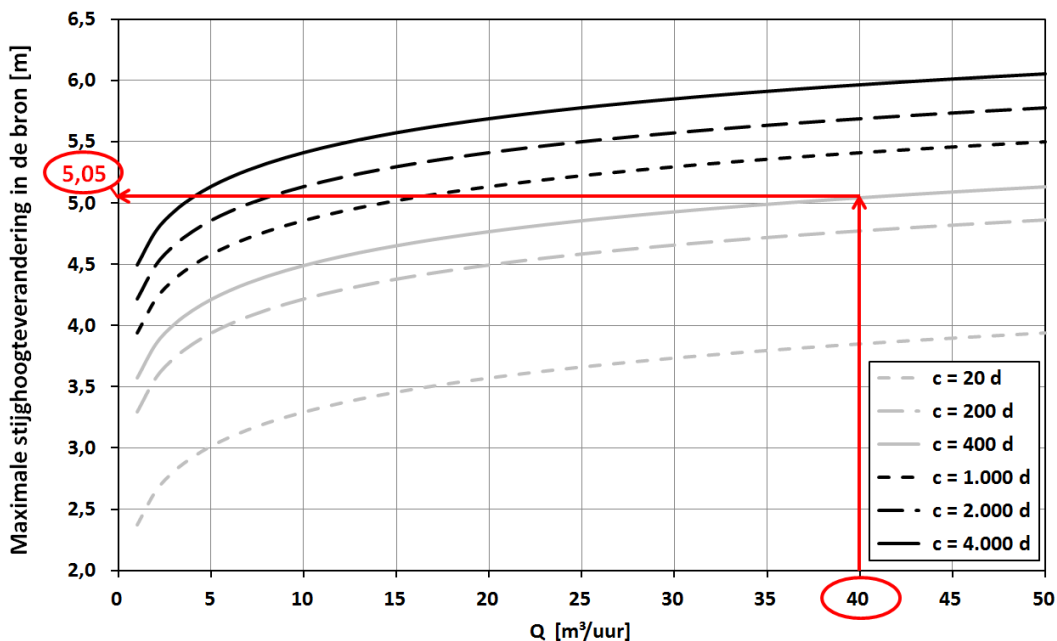
Het maximale debiet (Q) is de waarde op de x-as. Op basis van de weerstand tussen de bronfilters van de monobron kan vervolgens via de betreffende lijn de maximale stijghoogteverandering worden afgelezen op de y-as.

Let op:

- Wanneer de c -waarde kleiner is dan 20 dagen, wordt voor de stijghoogteverandering de waarde afgelezen die hoort bij $c = 20$ d.
- Bij keuze van de te gebruiken lijn op de grafiek wordt altijd naar boven afgerond. Bijvoorbeeld: Wanneer de c -waarde tussen de 20 en 200 dagen valt, wordt de waarde afgelezen die hoort bij $c = 200$ d (worst-case benadering). ~~Bij keuze van de te gebruiken lijn op de grafiek wordt dus altijd naar boven afgerond.~~
- Wanneer de c -waarde groter is dan 4.000 dagen, wordt voor de stijghoogteverandering de waarde afgelezen die hoort bij $c = 4.000$ dagen.

Voorbeeld:

Het maximale debiet van een systeem is 40 m³/uur. De weerstand van de bodemlagen tussen de filters is 300 dagen. 300 dagen zit tussen de 200 en 400 dagen. De lijn die hoort bij een weerstand van 400 dagen wordt dan gebruikt. De afgelezen verlaging in de bron is circa 5,1 m.



Onderbouwing en aannames bij de grafiek

Een monobron is vergelijkbaar met een doublet, met als enige verschil dat de bronfilters in dit geval niet horizontaal, maar verticaal uit elkaar geplaatst zijn. Midden tussen de bronfilters is de invloed van het onttrekkingsfilter gelijk aan de invloed van het infiltratiefilter, waardoor de stijghoogte ter plaatse niet verandert. De veranderingen boven en onder deze diepte zijn exact gelijk, maar tegengesteld. Het vlak midden tussen de bronfilters kan daarom worden gezien als spiegelvlak. Er zijn analytische oplossingen beschikbaar die uitgaan van spiegelvlakken, zowel voor doubletten (verticaal spiegelvlak tussen de onttrekkingsbron en de infiltratiebron) als voor monobron (horizontaal spiegelvlak). Voor de monobron ziet deze oplossing er als volgt uit (Bot, B., 2014¹⁶, Grondwaterzakboekje, Uitgeverij: Bot Raadgevend Ingenieur):

$$dh = \frac{Q}{2\pi kD} K_0 \left(\frac{r}{\sqrt{kD \cdot \frac{1}{2}c}} \right)$$

Waarbij:

- dh = stijghoogteverandering [m]
- Q = debiet waarmee grondwater wordt onttrokken en geïnfilteerd [m³/dag]
- k = doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/dag]
- D = dikte van het watervoerende pakket [m]
- K₀ = Besselfunctie
- r = afstand tussen het middelpunt van de onttrekkingsput en het punt waarvoor de stijghoogteverandering wordt berekend (in dit geval gelijk aan de boorgat straal) [m]
- ½c = weerstand van de lagen tussen de bronfilters en het spiegelvlak, dit is gelijk aan de helft van de verticale weerstand van de bodem tussen beide bronfilters [dagen]

Deze vergelijking komt overeen met de methode van De Glee (Kruseman, G.P. en de Ridder, N.A. (1994). Analysis and Evaluation of Pumping Test Data - Second Edition (Completely Revised). ILRI-Publication 47, Wageningen.). Als wordt aangenomen dat de onttrekkingsnorm bepalend is voor de benodigde filterlengte, dan is de waarde van kD van het filtertraject afhankelijk van het debiet en de straal van het boorgat ter hoogte van het bronfilter (r_w) volgens:

$$kD = \frac{Q}{4\pi r_w}$$

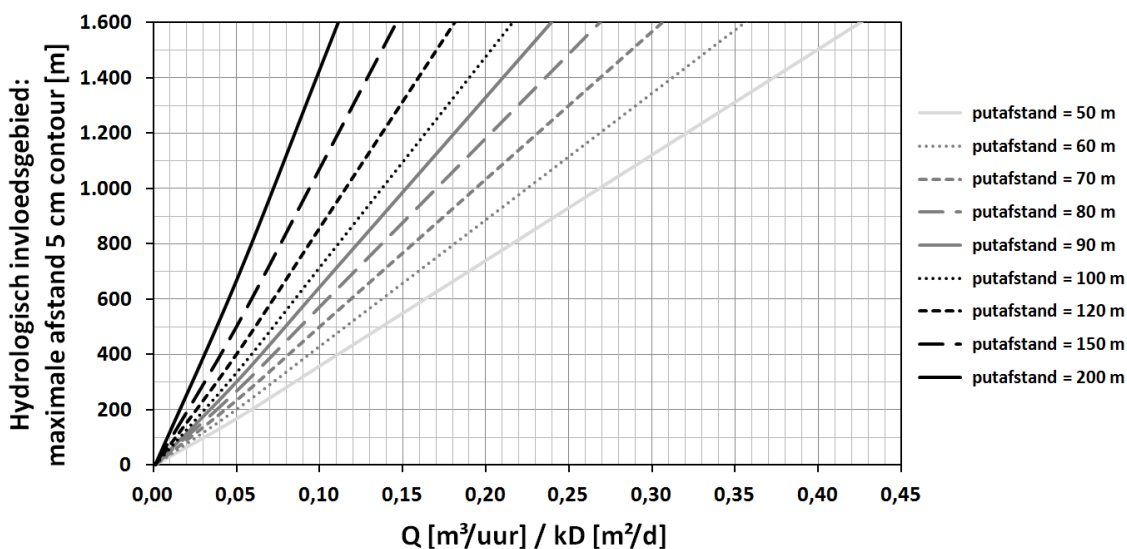
Als een vaste putstraal wordt aangenomen, dan is de stijghoogteverandering op afstand r alleen nog maar afhankelijk van Q en c. In grafiek 2 is de maximale stijghoogteverandering in de bron, voor een aantal waarden van de weerstand tussen de bronfilters (c), in beeld gebracht als functie van het debiet (Q).

Aannames

De volgende aannames zijn gedaan:

- De boordiameter is 0,8 m ($r = 0,4$ m); dit is een relatief grote diameter (worst-case: uit de onttrekkingsnorm volgt in dat geval namelijk een relatief lage kD en dat leidt tot een grotere stijghoogteverandering in de bron).
- Het systeem voldoet aan de onttrekkingsnorm: maximaal toegestane Darcy snelheid op de boorgatwand [m/d] is 2 maal de gemiddelde doorlatendheid [m/d]. Als het systeem niet voldoet aan de norm mag de grafiek niet zonder meer gebruikt worden. Neem contact op met het bevoegd gezag om te bepalen hoe hiermee om te gaan. Wellicht kan de verlaging in de bron worden berekend met een modelberekening welke wordt toegevoegd in de bijlage.

Grafiek 3. Hydrologisch invloedsgebied voor doubletsystemen (opslag en recirculatie)



Gebruik van de grafiek 3

Het hydrologisch invloedsgebied van een doubletsysteem wordt afgelezen uit grafiek 3. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende parameters:

- het maximale debiet (Q) [m³/uur] of [m³/dag]
- het doorlaatvermogen van de gebruikte watervoerende laag, kD [m²/dag]
- afstand tussen de bronnen, L [m]

Het maximale debiet (Q) wordt gedeeld door het doorlaatvermogen van de gebruikte watervoerende laag (kD). Het getal dat hier uitkomt, is de waarde op de x-as. Waar deze waarde de bijbehorende lijn van de putafstand kruist, wordt de straal van het hydrologische invloedsgebied afgelezen op de y-as.

Let op:

- **Wanneer de putafstand kleiner is dan 50 m wordt voor de straal van het hydrologische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij putafstand = 50 m. In de effectenstudie wordt vermeld dat de straal van het hydrologische invloedsgebied kleiner is dan (<) de afgelezen waarde in de grafiek.**
- **Bij keuze van de te gebruiken lijn op de grafiek wordt altijd naar boven afgerond. Bijvoorbeeld: Wanneer de putafstand tussen de 50 en 60 m valt, wordt de waarde afgelezen die hoort bij putafstand = 60 m (worst-case benadering).**
- **Wanneer de putafstand groter is dan 200 m, wordt voor de straal van het hydrologische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij putafstand = 200 m.**

- In situaties met een kleine filterlengte ten opzichte van de dikte (D) van het watervoerende pakket, kan het hydrologische invloedsgebied enigszins groter zijn dan grafiek 3 aangeeft. Als in de directe omgeving van het invloedsgebied – afgeleid op basis van grafiek 3 - een grondwaterbelang is gelegen, kan overwogen worden om de hydrologische effecten modelmatig te laten berekenen.

Toelichting:

In 2022 zijn modelberekeningen uitgevoerd om na te gaan of grafiek 3 goede uitkomsten geeft bij kleine filterlengtes ten opzichte van de dikte (D) van het watervoerende pakket [Notitie Update opzoekgrafieken bijlage 3.2 BUM BE deel 1 v2.4, IF Technology, kenmerk 62164/LL/20220426, 26 april 2022].

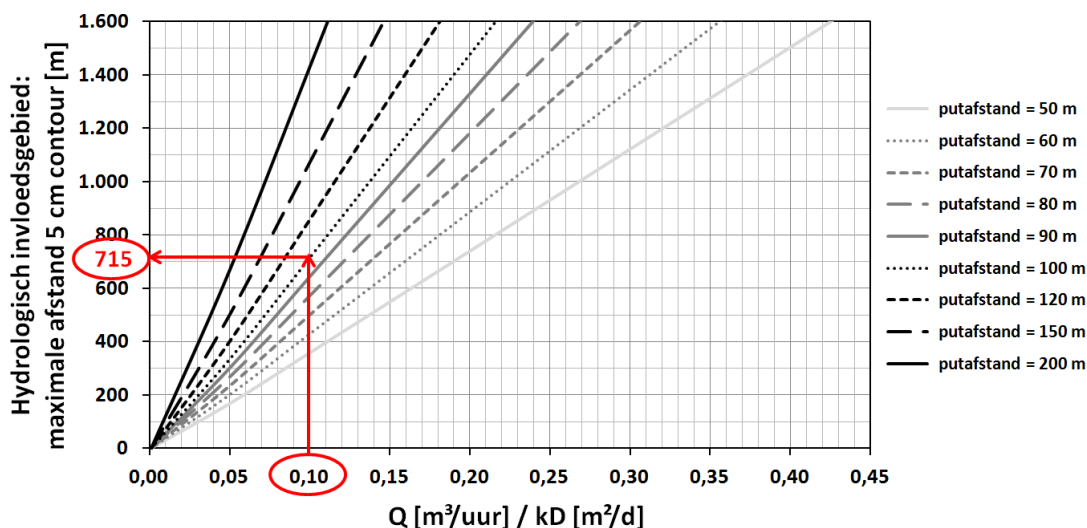
Uit de modelberekening blijkt het volgende:

De opzoekgrafieken geven over het algemeen een goede voorspelling doen van de grootte van het hydrologische invloedsgebied. In situaties met een kleine filterlengte ten opzichte van de dikte (D) van het watervoerende pakket, kan het invloedsgebied echter iets 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.

Definitie van een watervoerende laag: de laag waarin het filter is gesteld met bijbehorende boven- en onderliggende zandlagen die niet zijn afgescheiden door een scheidende kleilaag.

Voorbeeld:

Het maximale debiet van een systeem is 40 m³/uur. De dikte van de gebruikte watervoerende laag is 40 meter. In de bovenste 20 meter komt het filter. Er zitten geen scheidende lagen in het de watervoerende pakketlaag. Het doorlaatvermogen van de gebruikte watervoerende laag inclusief onderliggende zandlagen is 400 m²/dag. $40 / 400 = 0,10$. De putafstand bedraagt 95-100 m en ligt tussen de lijnen met putafstand 90 en 100 m. Voor deze putafstand wordt, D dit is de zwart gestippelde lijn die hoort bij een putafstand van 100 m wordt dan gebruikt. Hieruit volgt een straal van het hydrologische invloedsgebied van circa 715 m.



Onderbouwing

Het hydrologisch invloedsgebied is in de toelichting op het aanvraagformulier voor de vergunning Waterwet gedefinieerd als de afstand vanaf de bron(nen) van een open bodemenergiesysteem tot waar een stijghoogteverandering van 5 cm kan optreden. Het omschrijven van de formule gebruikt bij grafiek 1 levert dan de volgende vergelijking op:

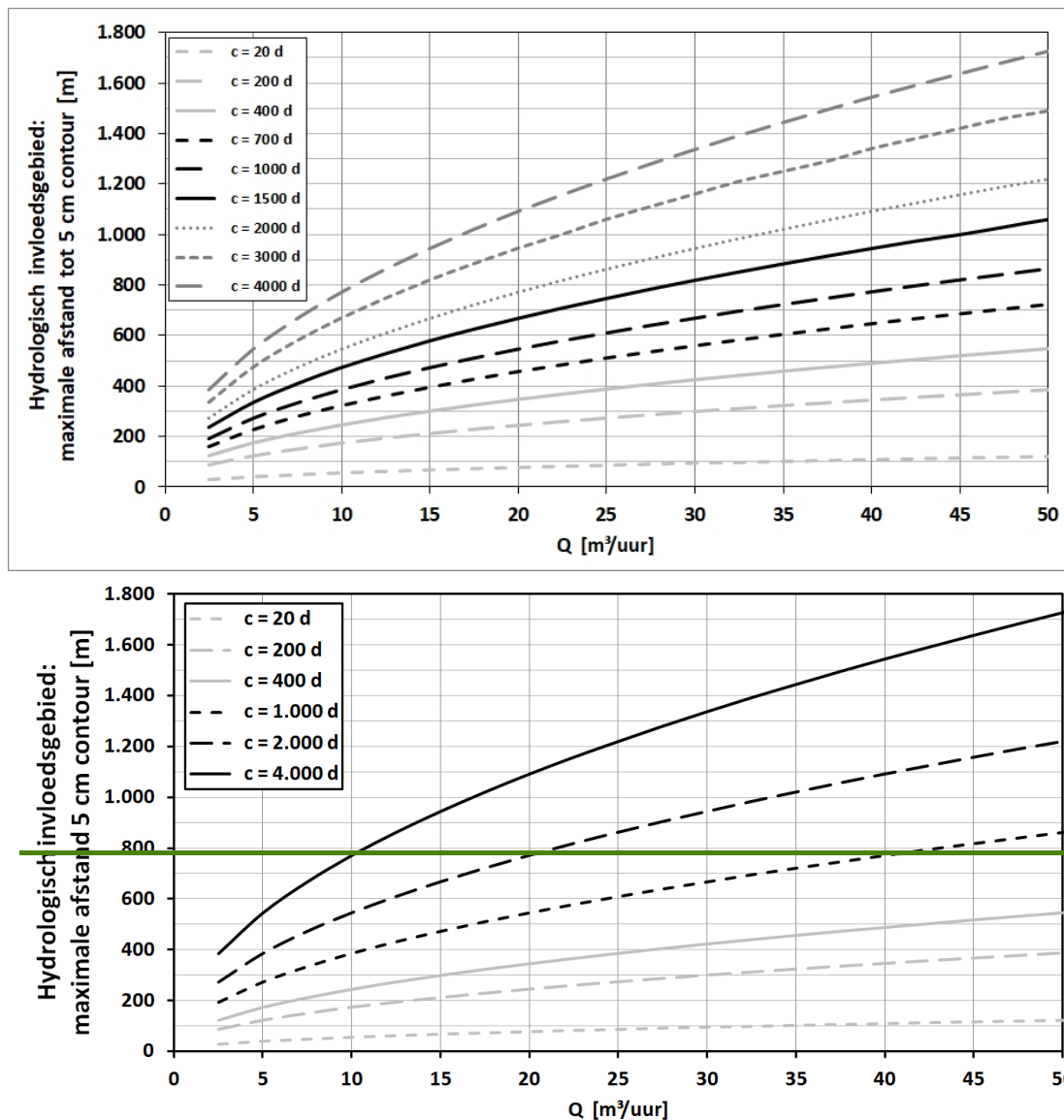
$$r_2 = \frac{L}{e^{\left(\frac{2\pi k D d h}{Q}\right)} - 1}$$

Waarbij:

- dh = stijghoogteverandering [m]
Q = debiet waarmee grondwater wordt onttrokken en geïnfiltreerd [m³/dag]
k = doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/dag]
D = dikte van de gebruikte watervoerende laag [m]
r₂ = maximale afstand van de infiltratie- of onttrekkingsput tot de locatie met de gevraagde stijghoogteverandering [m]
dh = gevraagde stijghoogteverandering [m]; in dit geval gelijk aan 0,05 m
L = afstand tussen de bronnen [m]

CONCEPT

Grafiek 4. Hydrologisch invloedsgebied voor monobronsystemen (opslag en recirculatie)



Gebruik van de grafiek

Het hydrologisch invloedsgebied van een monobron wordt afgelezen uit grafiek 4. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende parameters:

- het maximale debiet in m³ per uur, Q [m³/uur]
- de weerstand van de bodemlagen tussen de bronfilters, c [dagen]

Het maximale debiet (Q) is de waarde op de x-as. Op basis van de weerstand tussen de bronfilters van de monobron kan vervolgens via de betreffende lijn de straal van het hydrologische invloedsgebied worden afgelezen op de y-as.

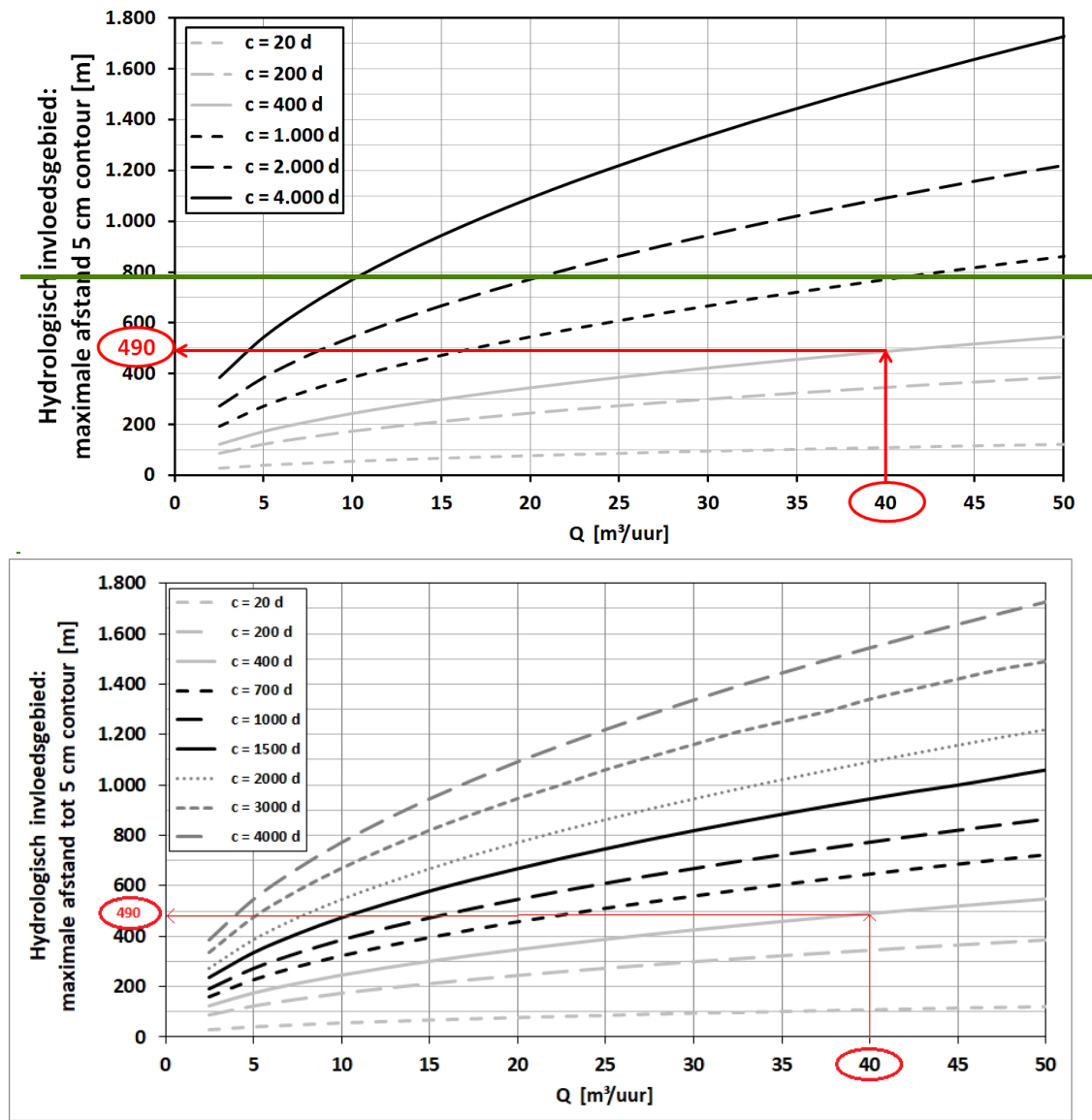
Let op:

- Wanneer de c -waarde kleiner is dan 20 dagen, wordt voor de straal van het hydrologische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij $c = 20$ d. In de effectenstudie wordt vermeld dat de straal van het hydrologische invloedsgebied kleiner is dan (<) de afgelezen waarde in de grafiek.
- Bij keuze van de te gebruiken lijn op de grafiek wordt altijd naar boven afgerond. **Bijvoorbeeld:** Wanneer de c -waarde tussen de 20 en 200 dagen valt, wordt de waarde afgelezen die hoort bij $c = 200$ d (worst-case benadering).

- Wanneer de c-waarde groter is dan 4.000 dagen, wordt voor de straal van het hydrologische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij $c = 4.000$ dagen.

Voorbeeld:

Het maximale debiet van het systeem is $40 \text{ m}^3/\text{uur}$. De weerstand van de bodemlagen tussen de filters is 300 dagen. 300 dagen zit tussen de 200 en 400 dagen. De 400-dagen lijn wordt gebruikt. De straal van het hydrologische invloedsgebied is hiermee circa 490 m.



Onderbouwing

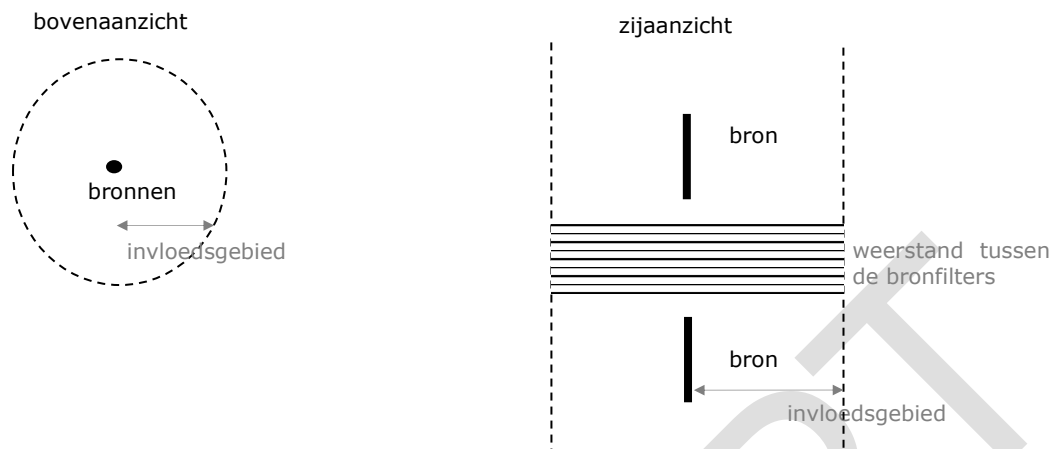
Het hydrologische invloedsgebied is in de toelichting op het aanvraagformulier voor de watervergunning gedefinieerd als de afstand vanaf de bronnen van een open bodemenergiesysteem tot waar een stijghoogteverandering van 5 cm kan optreden.

Voor verdere onderbouwing van de totstandkoming van grafiek 4 wordt verwezen naar de onderbouwing van grafiek 2: maximale verlaging dan wel verhoging van de stijghoogte in de bron voor doubletsystemen.

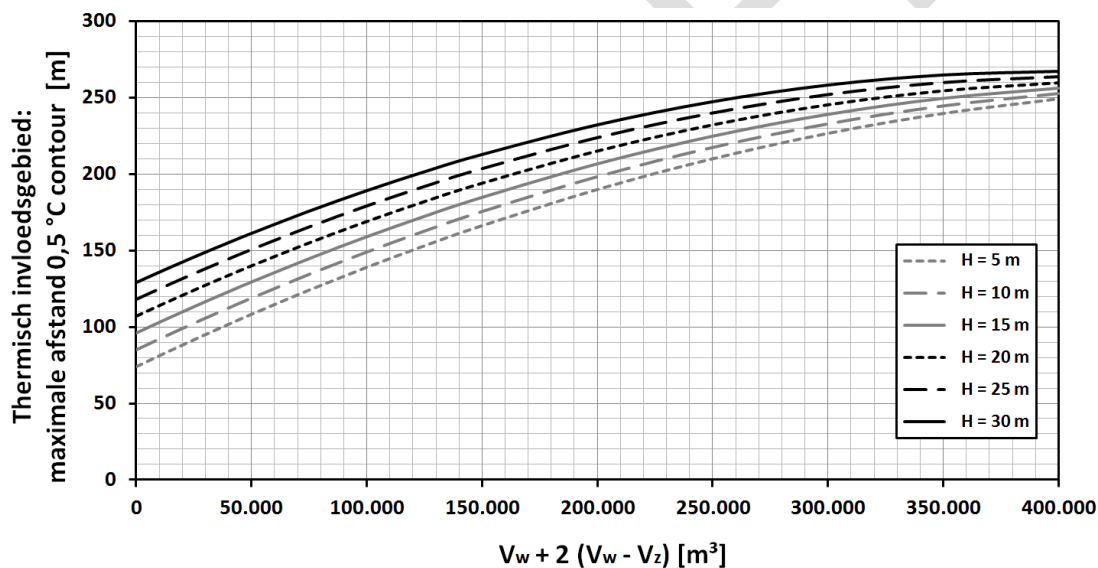
Aannames

- De boorgatdiameter is $0,8 \text{ m}$ ($r = 0,4 \text{ m}$); dit is een relatief grote diameter (worst-case: uit de onttrekkingsnorm volgt in dat geval namelijk een relatief lage kD en dat leidt tot een grotere stijghoogteverandering in de bron).

- Het systeem voldoet aan de SIKB BRL 11000 en bijbehorende Protocol 11001 en dus de NVOE-onttrekkingsnorm (maximaal toegestane Darcy snelheid op de boorgatwand [m/d] is twee maal de gemiddelde doorlatendheid [m/d]). Wanneer het systeem niet voldoet aan de onttrekkingsnorm is het daarom noodzakelijk om het standaard vergunningtraject te doorlopen.



Grafiek 5. Thermisch invloedsgebied voor opslagsystemen (doublet en monobron) met energiebalans én koudeoverschot in de ondergrond bij verschillende filterlengtes (H)



Gebruik van de grafiek

In deze grafiek is de maximale straal van het thermisch invloedsgebied na 20 jaar weergegeven (in horizontale richting vanaf één van de bronnen). Zowel voor doubletsystemen als voor monobronsystemen zijn er twee thermische invloedsgebieden: de warme bel en de koude bel. Bij systemen met een energiebalans zijn de warme en de koude bel ongeveer even groot. Bij systemen met een koudeoverschot in de ondergrond is de koude bel groter dan de warme bel. In de grafiek wordt het maximale thermische invloedsgebied afgelezen.

Het thermisch invloedsgebied [m] wordt afgelezen uit grafiek 5 met behulp van de volgende parameters:

- maximale hoeveelheid water die per jaar in de koude bron wordt geïnfiltreerd, V_w [m³] (=V_{winter})
- maximale hoeveelheid water die per jaar in de warme bron wordt geïnfiltreerd, V_z [m³] (=V_{zomer})
- filterlengte, H [m]

Bij de maximale hoeveelheid water die per jaar in de koude bron wordt geïnfiltreerd (V_w) wordt twee maal het verschil tussen V_w en V_z opgeteld. Het getal dat hier uitkomt, is de waarde op de x-as. Voor

verschillende lengten van het bronfilter zijn in de grafiek verschillende lijnen opgenomen. Aan de hand van de lengte van het bronfilter kan vervolgens via de betreffende lijn de straal van het thermische invloedsgebied worden afgelezen op de y-as.

Deze grafiek berekent het thermisch invloedsgebied van de koude bel. Voor de straal van de warme bel wordt dezelfde straal aangehouden, hoewel de straal van de warme bel bij een koude overschot waarschijnlijk kleiner zal zijn (worst-case aanname).

Let op:

- Wanneer de filterlengte groter is dan 30 m wordt voor de straal van het thermische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij filterlengte = 30 m. In de effectenstudie wordt vermeld dat de straal van het thermische invloedsgebied groter is dan (>) de afgelezen waarde in de grafiek.
- Bij keuze van de gebruiken lijn op de grafiek wordt altijd naar benden afgerond. Voorbeeld: Wanneer de filterlengte tussen de 30 en 25 m valt, wordt de waarde afgelezen die hoort bij putafstandfilterlengte = 25 m (worst-case benadering).
- Wanneer de filterlengte kleiner is dan 5 m, wordt voor de straal van het thermische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij filterlengte = 5 m.

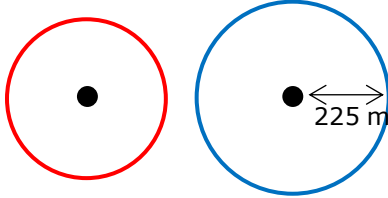
Voorbeeld 1:

Een doubletsysteem infiltreert per jaar maximaal 80.000 m³ in de koude bron en maximaal 30.000 m³ in de warme bron (koudeoverschot). De filterlengte van het systeem is 30 m.

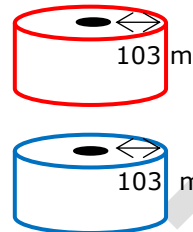
$$V_w + 2 (V_w - V_z) = 80.000 + 2 (80.000 - 30.000) = 180.000 \text{ m}^3.$$

De straal van het thermische invloedsgebied vanaf de koude bron is dan circa 225 m.

Bovenaanzicht



Zijaanzicht



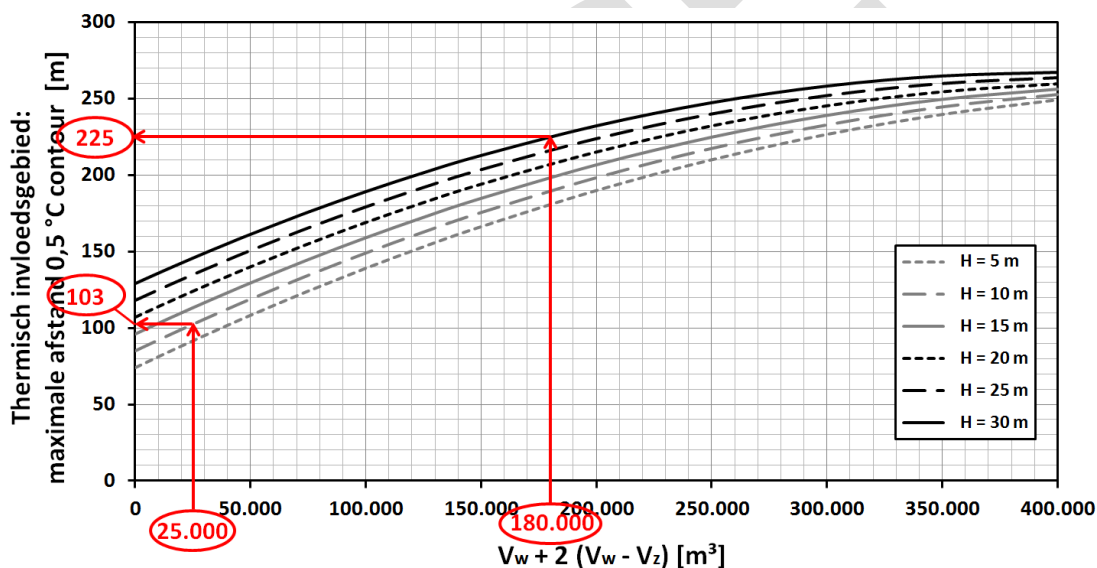
Voorbeeld 2:

Een monobronstelsel infiltreert per jaar maximaal 25.000 m³ in de koude bron en maximaal 25.000 m³ in de warme bron (energiebalans).

De lengte van het warme en het koude bronfilter is 10 m.

$$V_w + 2 (V_w - V_z) = 25.000 + 2 (25.000 - 25.000) = 25.000 \text{ m}^3.$$

De straal van het thermische invloedsgebied ter hoogte van het warme en het koude bronfilter is circa 103 m.

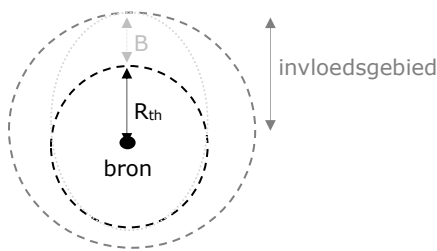


Onderbouwing

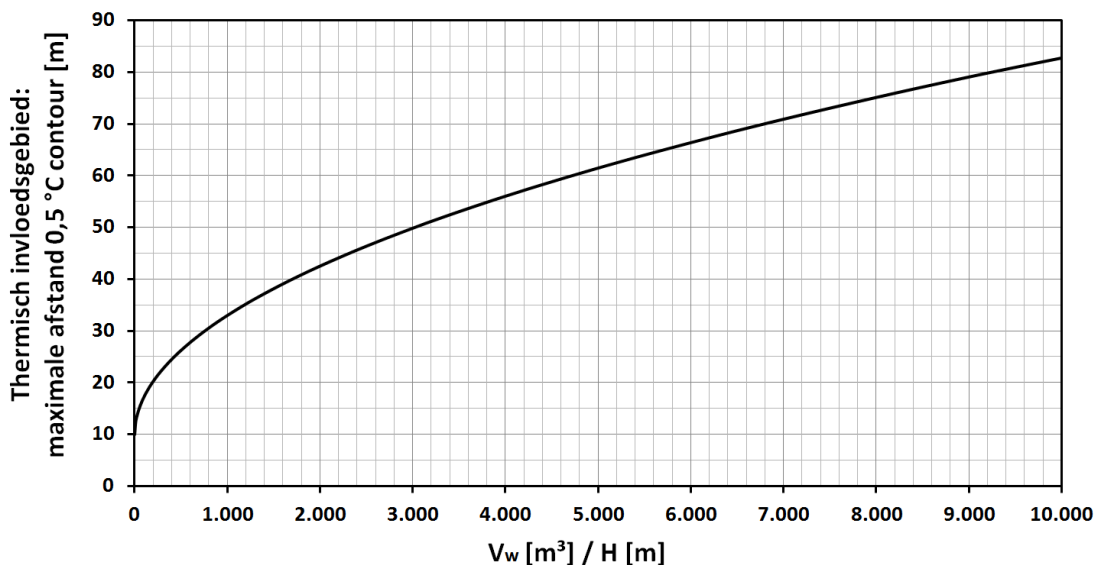
Het thermisch invloedsgebied is in de toelichting op het aanvraagformulier voor de watervergunning gedefinieerd als de afstand vanaf de bronnen van een open bodemenergiesysteem tot waar na 20 jaar een temperatuursverandering van 0,5°C kan optreden. Het thermisch invloedsgebied is gebaseerd op een reeks modelberekeningen, waarbij voor verschillende filterlengtes en voor verschillende waterhoeveelheden per seizoen het thermisch invloedsgebied na 20 jaar is bepaald. In de modelberekeningen is uitgegaan van een grondwaterstroming van 20 meter per jaar en infiltratietemperaturen die 5°C afwijken van de natuurlijke grondwatertemperatuur. In de praktijk zal de grondwaterstromingssnelheid vaak lager zijn dan 20 meter per jaar. Bij lagere grondwaterstromingssnelheden zouden de lijnen in de grafiek normaliter anders gericht en een andere kromming hebben; het thermische effect bij kortere filterlengtes (H) zou dan groter zijn dan bij langere filterlengtes (H). De grondwaterstromingssnelheid is van grote invloed op de grootte van het thermische effect, omdat naarmate het grondwater sneller stroomt, sprake is van er meer energie-uitwisseling met de onder- en bovenliggende (scheidende) lagen plaatsvindt. Bij een hogere

grondwaterstromingssnelheid is daardoor sprake van een kleiner thermisch invloedsgebied bij een kortere filterlengte. De grafiek is echter wel dusdanig van opzet, dat het afgelezen thermische invloedsgebied naar verwachting altijd groter is dan (ook bij lagere grondwaterstromingssnelheden) met modelberekeningen zou worden berekend. Hiermee is de grafiek altijd toepasbaar, ook bij lagere grondwaterstromingssnelheden. De grafiek geeft de gevonden relaties voor de verschillende filterlengtes.

Bij een kleine filterlengte is het energieverlies uit de koude of warme bel naar de boven- en onderliggende bodemlagen (in verticale richting) relatief groot, waardoor het thermisch invloedsgebied relatief kleiner is dan bij een grotere filterlengte. Ook bij een kleine waterverplaatsing is sprake van een relatief klein thermisch invloedsgebied, doordat een smalle bel ontstaat die naar verhouding veel energie verliest aan het omringende grondwater (in horizontale richting). De toename van het thermisch invloedsgebied vlakt bij toenemend volume steeds verder af doordat het invloedsgebied een maximum benadert: het invloedsgebied kan namelijk niet verder reiken dan de afstand die de warmte/koude onder invloed van de grondwaterstroming in 20 jaar tijd kan afleggen.



Grafiek 6. Thermisch invloedsgebied voor recirculatiesystemen (doublet en monobron) met energiebalans in de ondergrond



Gebruik van de grafiek

In deze grafiek is de maximale straal van het thermisch invloedsgebied na 20 jaar weergegeven (in horizontale richting vanaf één de infiltratiebron).

Het thermisch invloedsgebied [m] wordt afgelezen uit grafiek 6 met behulp van de volgende ontwerp- en bodemparameters:

- de maximale waterhoeveelheid per seizoen, $V [m^3]$ (dit is gelijk aan de helft van de maximale hoeveelheid water die per jaar wordt verpompt)
- filterlengte, $H [m]$

De maximale waterhoeveelheid per seizoen (V_w of V_z) wordt gedeeld door de filterlengte (H). Het getal dat hier uitkomt is de waarde op de x-as. De straal van het thermisch invloedsgebied wordt afgelezen op de y-as.

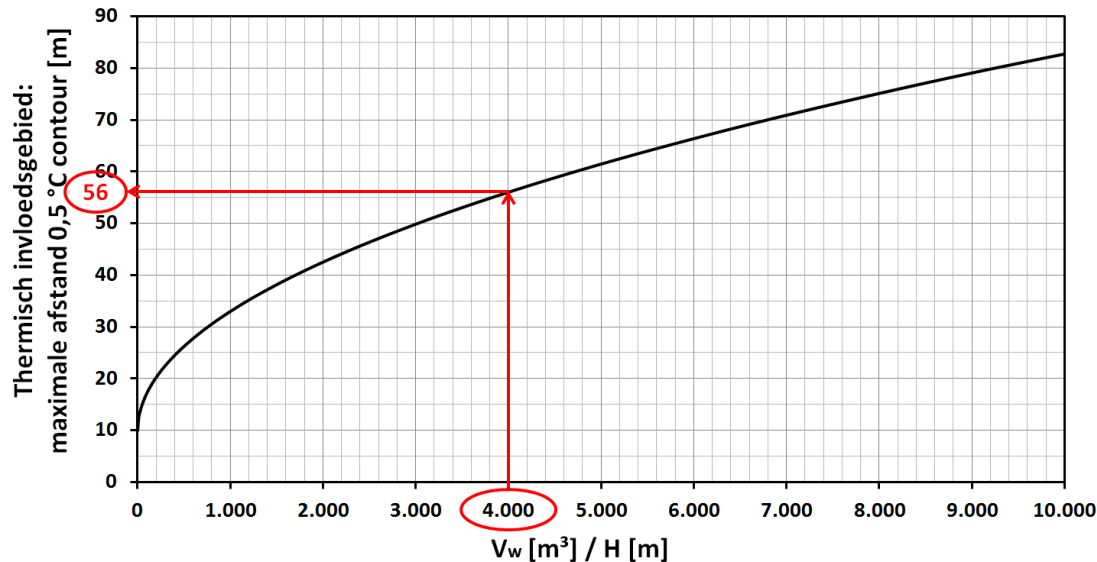
Voorbeeld:

Een recirculatiesysteem verpompt een waterhoeveelheid van 160.000 m³ per jaar.

Dit is maximaal 80.000 m³ per seizoen.

De filterlengte van het systeem is 20 m. $80.000 / 20 = 4.000$.

De straal van het thermische invloedsgebied vanaf de infiltratiebron is circa 56 m.



Onderbouwing

Het thermisch invloedsgebied is in de toelichting op het aanvraagformulier voor de watervergunning gedefinieerd als de afstand vanaf de bronnen van een open recirculatiesysteem tot waar een temperatuursverandering van 0,5°C kan optreden. Bij een energiebalans wordt elk jaar net zo veel koude als warmte geïnfiltreerd in de infiltratiebron. De jaargemiddelde temperatuur van het in de infiltratiebron geïnfiltreerde water is daardoor gelijk aan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Dit betekent dat de temperatuur van het afstromende infiltratiewater na een zekere verblijftijd gelijk zal zijn aan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Daardoor is er alleen thermische invloed in de directe omgeving van de infiltratiebron: aan het einde van de winter is er sprake van een bel met koud water en aan het einde van de zomer is er een bel met warm water. De straal van het thermisch invloedsgebied wordt dus bepaald door de grootte van de bel met koud dan wel warm water aan het einde van het seizoen. Deze wordt vooral bepaald door de hoeveelheid water die in één seizoen wordt geïnfiltreerd per meter filterlengte. Daarnaast is de invloed van enige afstroming en menging met het omringende grondwater van belang.

De straal van het thermisch invloedsgebied is berekend met de volgende formule:

$$I_{th} = R_{th} + C = \sqrt{\frac{r \cdot V}{H}} + C$$

Waarbij:

- I_{th} = thermisch invloedsgebied vanaf het middelpunt van de infiltratiebron [m]
- R_{th} = thermische straal [m]
- C = constante die de invloed van afstroming en menging vertegenwoordigt [m]
- r = vertragsingsfactor [-]
- V = maximale waterhoeveelheid per seizoen [m³]
- H = filterlengte [m]

Aannames

De volgende aannames zijn gedaan:

- Voor de waarde van de constante (C) is 10 m aangehouden. Dit is gebaseerd op een reeks modelberekeningen voor recirculatiesystemen met een energiebalans, waarbij is uitgegaan van een grondwaterstroming van 20 m/jaar.
- De vertragsfactor is 0,53 ($r = 0,53$); de vertragsfactor is berekend met de volgende formule:

$$r = \frac{n \cdot C_w}{n \cdot C_w + (1 - n)C_r}$$

Waarbij:

$C_w = 4,2 \text{ MJ/m}^3$ = warmtecapaciteit van het grondwater []

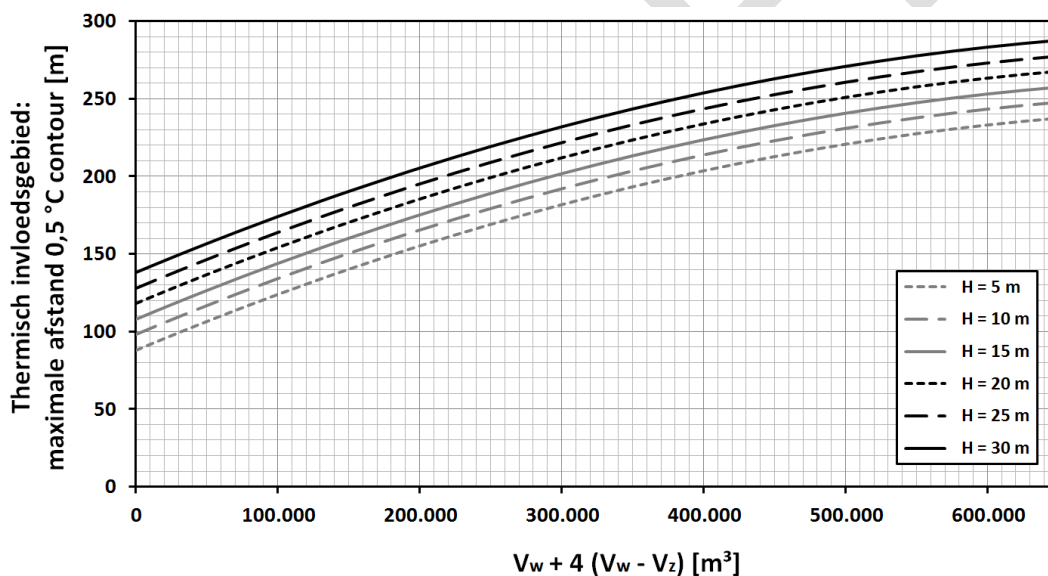
$C_r = 2,0 \text{ MJ/m}^3$ = warmtecapaciteit van het zand [MJ/m³]

$n = 0,35$ = porositeit [-]

Hierdoor is de vergelijking als volgt:

$$I_{th} = \sqrt{\frac{0,53 \cdot V}{H}} + 10$$

Grafiek 7. Thermisch invloedsgebied voor recirculatiesystemen (doublet en monobron) met koudeoverschot in de ondergrond bij verschillende filterlengtes (H)



Gebruik van de grafiek

In deze grafiek is de maximale straal van het thermisch invloedsgebied na 20 jaar weergegeven (in horizontale richting vanaf één de infiltratiebron).

Het thermisch invloedsgebied [m] wordt afgelezen uit grafiek 7 met behulp van de volgende parameters:

- maximale hoeveelheid koud water die per jaar in de infiltratiebron wordt geïnfiltreerd, V_w [m³] (=V_{winter})
- maximale hoeveelheid warm water die per jaar in de infiltratiebron wordt geïnfiltreerd, V_z [m³] (=V_{zomer})
- filterlengte, H [m]

Bij de maximale hoeveelheid koud water die per jaar in de infiltratiebron wordt geïnfiltreerd (V_w) wordt vier maal het verschil tussen V_w en V_z opgeteld. Het getal dat hier uitkomt, is de waarde op de x-as. Voor verschillende lengtes van het bronfilter zijn in de grafiek verschillende lijnen opgenomen. Aan

de hand van de lengte van het bronfilter kan vervolgens via de betreffende lijn de straal van het thermische invloedsgebied worden afgelezen op de y-as.

Let op:

- Wanneer de filterlengte (H) groter is dan 30 m wordt voor de straal van het thermische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij filterlengte = 30 m. In de effectenstudie wordt vermeld dat de straal van het thermische invloedsgebied groter is dan (>) de afgelezen waarde in de grafiek.
- Bij keuze van de te gebruiken lijn op de grafiek wordt altijd naar beneden afgerond. Bijvoorbeeld: Wanneer de filterlengte (H) tussen de 30 en 25 m valt, wordt de waarde afgelezen die hoort bij filterlengte putafstand = 25 m (worst-case benadering).
- Wanneer de filterlengte (H) putafstand kleiner is dan 5 m, wordt voor de straal van het thermische invloedsgebied de waarde afgelezen die hoort bij filterlengte = 5 m.

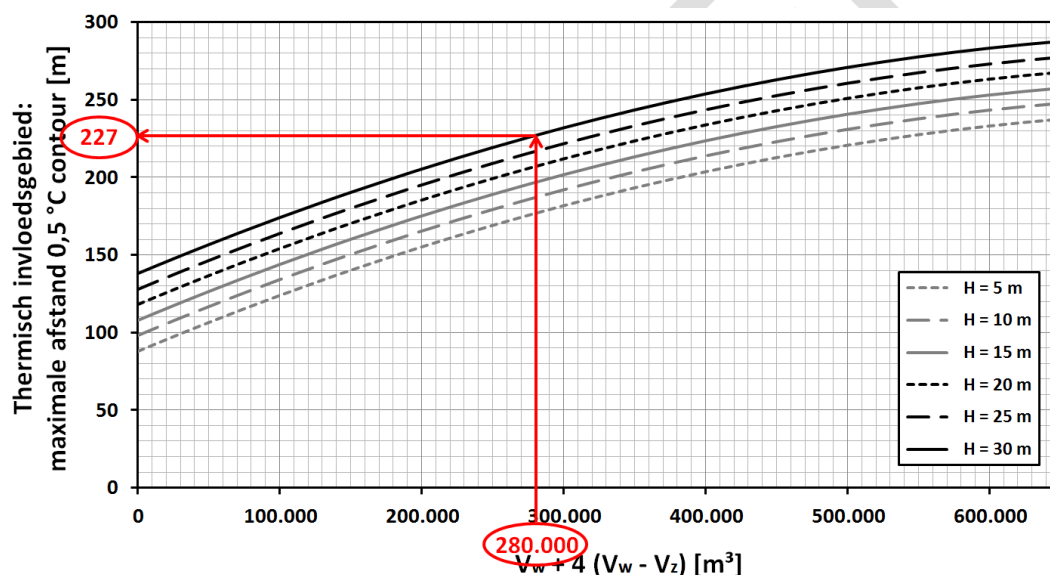
Voorbeeld:

Een recirculatiesysteem infiltreert in de winter maximaal 80.000 m³ koud water en in de zomer maximaal 30.000 m³ warm grondwater in de infiltratiebron.

De filterlengte van het systeem is 30 m.

$$V_w + 4 (V_w - V_z) = 80.000 + 4 (80.000 - 30.000) = 280.000 \text{ m}^3.$$

Het thermisch invloedsgebied reikt dan tot circa 227 m van de infiltratiebron.



Onderbouwing

Het thermisch invloedsgebied is in de toelichting op het aanvraagformulier voor de watervergunning gedefinieerd als de afstand vanaf de bronnen van een open bodemenergiesysteem tot waar na 20 jaar een temperatuursverandering van 0,5°C kan optreden. Het thermisch invloedsgebied is gebaseerd op een reeks modelberekeningen, waarbij voor verschillende filterlengtes en voor verschillende waterhoeveelheden per seizoen het thermisch invloedsgebied na 20 jaar is bepaald. In de modelberekeningen is uitgegaan van een grondwaterstroming van 20 m/jaar en infiltratietemperaturen die 5°C afwijken van de natuurlijke grondwatertemperatuur. De grafiek geeft de gevonden relaties voor de verschillende filterlengtes.

Bij een kleine filterlengte is het energieverlies uit de koude of warme bel naar de boven- en onderliggende bodemlagen (in verticale richting) relatief groot, waardoor het thermisch invloedsgebied relatief kleiner is dan bij een grotere filterlengte. Ook bij een kleine waterverplaatsing is sprake van een relatief klein thermisch invloedsgebied, doordat een smalle bel ontstaat die naar verhouding veel energie verliest aan het omringende grondwater (in horizontale richting). De toename van de straal van het thermisch invloedsgebied vakt bij toenemend volume steeds verder af doordat het

invloedsgebied een maximum benadert: het invloedsgebied kan namelijk niet verder reiken dan de afstand die de warmte/koude onder invloed van de grondwaterstroming in 20 jaar tijd kan afleggen.

CONCEPT