

# Ontwerprichtlijnen voor bodemenergiesystemen

---

*Optimale verticale scheiding voor  
monobronsystemen*

BACHELOR EINDWERK CIVIELE TECHNIEK

TU DELFT

ERIK VAN UTENHOVE

Supervisor:  
Ir. M. Bloemendal  
Prof. Dr.ir. T. Olsthorn



## Abstract

Dit BSc eindwerk is opgesteld om de optimale verticale afstand tussen de warmte- en koudebron van monobronnen te onderzoeken. Hiervoor is kennis over grondwaterstromingen en stijghoogteveranderingen vereist. Deze zijn beide afhankelijk van de systeemdimensies en lokaal geldende bodemkarakteristieken.

In dit rapport is onderzocht hoe de systeemdimensies en bodemparameters de optimale bronscheiding van monobronnen beïnvloed. Doormiddel van een variërende capaciteitsrage van 2.5 – 50 m<sup>3</sup>/h zijn verschillende monbronnen gesimuleerd onder anisotropie-waarde 2, 5 en 10. Daarnaast is onderzocht hoe de systeemdimensies afhankelijk zijn van de dikte van de aquifer en voor welke dimensies geldt dat warmteverliezen geminimaliseerd worden.

Uit de simulatie volgde dat de optimale bronscheiding profijt heeft van een hoge anisotropie en lange filterlengte. De filterlengte is echter weer van invloed op de vorm van de thermische bel en zo ook bepalend voor warmteverliezen. Bij een hoger vergund volume moeten een langere bronscheiding gehanteerd worden. Een verhoging van het volume gaat gepaard met een minder sterke toename in warmteverliezen. Er geldt dus dat voor grotere systemen een hoger rendement behaald kan worden.

In 5.3 zijn de systeemdimensies gegeven voor minimale systeemplengte en in 5.4 de dimensies voor minimale warmteverliezen.

# Inhoudsopgave

<b>Abstract</b> .....	<b>i</b>
<b>1. Inleiding</b> .....	<b>1</b>
1.1 Context.....	1
1.2 Doel van het onderzoek.....	2
1.3 Plan van aanpak.....	2
<b>2. Achtergrondinformatie bodemenergie</b> .....	<b>3</b>
2.1 Bodemenergiesystemen.....	3
2.2 Geothermie.....	3
2.2 Hogetemperatuuropslag.....	3
2.3 Open bron.....	4
2.3.1 Recirculatie.....	4
2.3.2 Warmte Koude Opslag (WKO).....	4
2.3.2.1 Monobron.....	5
2.3.2.2 Doublet.....	5
2.4 Gesloten bron.....	6
<b>3. Theoretische achtergrond</b> .....	<b>7</b>
3.1 Bodemparameters.....	7
3.1.1 Geschikt watervoerend pakket.....	7
3.1.2 Porositeit.....	7
3.1.3 Doorlatendheid.....	8
3.2 Warmtetransport.....	9
3.2.1 Grondwaterstroming.....	9
3.2.3 Conductie.....	9
3.2.2 Warmtecapaciteit.....	10
3.2.4 Dispersie.....	10
3.3 System parameters.....	11
3.3.1 Opslagvolume.....	11
3.3.2 Filterlengte.....	12
3.3.3 Verticale scheidingsafstand.....	12
<b>4. Onderzoeksmethode</b> .....	<b>13</b>
4.1 Stijghoogteverandering.....	13

4.2 Stroomsnelheid thermisch front.....	14
4.3 Modelling.....	14
4.3.1 Optimale verticale scheiding .....	15
4.3.2 Designformule: minimale systeemplengte.....	15
4.3.3 Designformule: minimale warmteverliezen .....	15
4.3.4 Parameters .....	16
<b>5. Resultaten .....</b>	<b>17</b>
5.1 Optimale verticale scheiding.....	17
5.2 Vergelijking theoretische waardes met bestaande cases.....	18
5.3 Optimaal design: minimale systeemplengte.....	18
5.4 Optimaal design: minimaal warmteverlies .....	20
<b>6. Conclusie .....</b>	<b>21</b>
<b>7. Aanbeveling .....</b>	<b>22</b>
<b>Referentie .....</b>	<b>23</b>
<b>Appendix A: Data Instellect .....</b>	<b>24</b>

# 1. Inleiding

## 1.1 Context

Door de klimaatveranderingen en de uitputting van fossiele brandstoffen speelt duurzame energie een grote rol in onze huidige samenleving. Het grote voordeel van duurzame bronnen is oneindigheid en minder, dan wel geen, CO<sub>2</sub> uitstoot. Nederland heeft als ambitieus doel voor 2020 gesteld dat 10% van het totale energieverbruik afkomstig moet zijn uit hernieuwbare bronnen (CBS, 2009). Toepassing van bodemenergie kan een grote rol spelen bij de haalbaarheid van deze doelstelling (Taskforce WKO, 2009).

Het klimaat en de bodemgesteldheid in Nederland is uitermate gunstige voor toepassing van warmte koude opslag, ook wel WKO systemen genoemd (Bloemendal et al.). Taskforce WKO (2009) voorspelt dat het aantal WKO systemen in 2020 exponentieel zal toenemen.

Door de toename om WKO systemen worden monobronnen steeds interessanter. Deze WKO configuratie bestaande uit een enkel boorgat waarin de warmte en koude bron boven elkaar geplaatst worden. In vergelijking met doublet systemen is minder bodemruimte nodig. Daarnaast kunnen meerdere monobronnen dicht naast elkaar worden geplaatst zonder dat de prestatie negatief beïnvloed wordt. Echter vereisen deze systemen meer inzicht in de stromingen en processen rondom de bronnen.

Om een zo hoog mogelijk rendement te behalen is het belangrijk dat het systeem goed is ontworpen. De verticale afstand tussen de twee bronnen speelt hierbij een belangrijke factor, waarbij kort cyclische stroming tussen de warmte- en koude bron moeten worden vermeden. Deze worden doormiddel van versimpelde formules en vuistregels bepaald. Hierbij is het de vraag dit in de praktijk een goede benadering geeft.

## 1.2 Doel van het onderzoek

Verbeteren van ontwerprichtlijnen die kunnen worden toegepast om de benodigde verticale scheidingsafstand van monobronnen te bepalen.

## 1.3 Plan van aanpak

Voor de plan van aanpak is het onderzoek in drie deelvragen opgesplitst.

- 1) Welke factoren zijn van invloed op het rendement van monobronnen?

De eerste deelvraag zal middels literaire studies worden beantwoord. Drie verschillende aspecten zullen in behandeling genomen worden:

- Bodemparameters
- Warmtetransport
- Energievraag

Allereerst wordt gekeken welke bodemeigenschappen van invloed zijn op grondwaterstromingen. Daarnaast wordt onderzocht aan welke eisen het watervoerend pakket moet voldoen om monobronnen te kunnen toepassen.

Ten tweede zullen de factoren die van invloed zijn op de warmte transport in de bodem behandeld worden. Er wordt bepaald door welke processen warmteverlies van de bron optreedt, en hoe deze berekend kunnen worden.

Als laatste wordt onderzocht hoe de energievraag van de gebruiker van invloed is op de systeemdimensie.

- 2) Welke bodemparameters beïnvloeden de vereiste verticale scheiding?

Voor deze deelvraag wordt gekeken wanneer er kortsluitstroming optreedt. De stromingen tussen de twee bellen worden hoofdzakelijk bepaald door stijghoogteverandering. Temperatuurverschillen spelen een ondergeschikte rol vanwege een kleine  $\Delta T$ . Door de stijghoogteverandering ontstaat stroming tussen de twee bellen. Onderzocht zal worden welke bodemparameters van invloed zijn op de stroomsnelheid. Op basis van de stroomsnelheid van het thermisch front moet een bepaalde verticale scheiding tussen de bronnen aangehouden worden

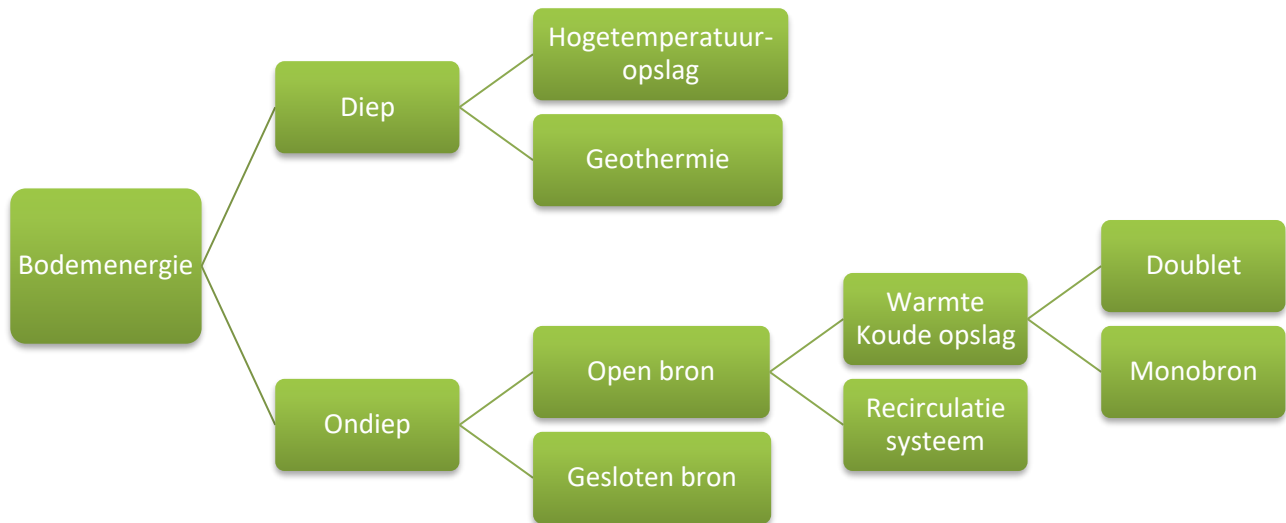
- 3) Welke invloed heeft het vergund volume op de benodigde verticale scheiding?

Door onttrekking en infiltratie zullen stijghoogteveranderingen in de bronnen optreden. De verhouding tussen het filterlengte en het opgeslagen thermische volume bepaald de vorm van de bel. Dit is van invloed op de stroomsnelheid van het thermisch front.

## 2. Achtergrondinformatie bodemenergie

### 2.1 Bodemengiesystemen

Bodemengiesystemen zijn duurzame bronnen die gebruik maken van de thermische opslagcapaciteit van de bodem. In de bodem bevinden zich zandlagen waardoor grondwater kan stromen. Een opeenstapeling van meerdere zandlagen wordt een watervoerend pakket genoemd. In een watervoerend pakket kan energie in de vorm van warmte of koude worden opgeslagen. In een later stadia kan dit weer worden opgepompt voor gebruik van verkoeling of verwarming van gebouwen. Daarnaast zijn er ook systemen die op grote diepte grondwater onttrekken. Grondwater in diepe lagen is opgewarmd door de aardkern en kan zo hoge temperaturen aannemen. Kortom, bodemengiesystemen komen in veel verschillende soorten en maten voor. Er wordt hoofdzakelijk onderscheid gemaakt tussen diepe en ondiepe systemen. Deze zijn vervolgens weer onder te verdelen in verschillende subdivisies, weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1: Classificering van verschillende soorten bodemengiesystemen

### 2.2 Geothermie

De kern van de aarde straalt continu warmte uit waardoor op grote diepte water van boven de 70 °C gevonden kan worden. In het algemeen geldt dat per 35 meter diepte de grondwatertemperatuur 1°C toeneemt (Bridger en Allen, 2005). Geothermie systemen winnen warmte door grondwater uit diepe watervoerende lagen ( 2 – 5 kilometer) op te pompen. Tevens kan energie worden opgewekt als temperaturen boven de 120 °C voorkomen.

### 2.2 Hogetemperatuuropslag

In de industrie gaat veel restwarmte verloren. Hogetemperatuuropslag maakt het mogelijk om de restwarmte diep in de bodem op te slaan zodat het op een later moment weer kan worden gebruikt

voor verwarming van gebouwen. Tevens kan hogetemperatuuropslag ook worden toegepast op andere processen waarbij veel warmte wordt geproduceerd. Zo gaat ongebruikte warmte-energie niet verloren.

Diepe systemen opereren met grondwater van hoge temperatuur. Dit is direct bruikbaar voor verwarmings systemen. Er gaat dus alleen energie verloren aan het verpompen van het water. Hierdoor kan een zeer hoog rendement behaald worden.

## **2.3 Open bron**

Bij een open bron wordt een put in het watervoerend pakket geplaatst. Hiermee wordt een warmte of koude bron gecreëerd. Het grondwater fungeert zowel als opslag- als verplaatsingsmedium. Open bronnen zijn van toepassing bij voor recirculatie en warmte koude opslag (WKO). WKO is onder te verdelen in een doublet en monobron.

### **2.3.1 Recirculatie**

Jaarlijks schommelt de grondwatertemperatuur tussen de 10 à 12 graden. Recirculatie systemen gebruiken een vaste bron voor grondwateronttrekking. Het opgepompte water wordt gebruikt voor continue verkoeling, maar kan bij lage buitentemperaturen in de winter ook worden gebruikt voor verwarming. Na de warmtewisselaar wordt het water in een vaste infiltratiebron gepompt.

### **2.3.2 Warmte Koude Opslag (WKO)**

Bij WKO systemen worden twee filters in eenzelfde watervoerend pakket geplaatst. De ene filter wordt gebuikt voor warm water en de andere filter voor koud water. Zo ontstaat er een koude en een warme bron.

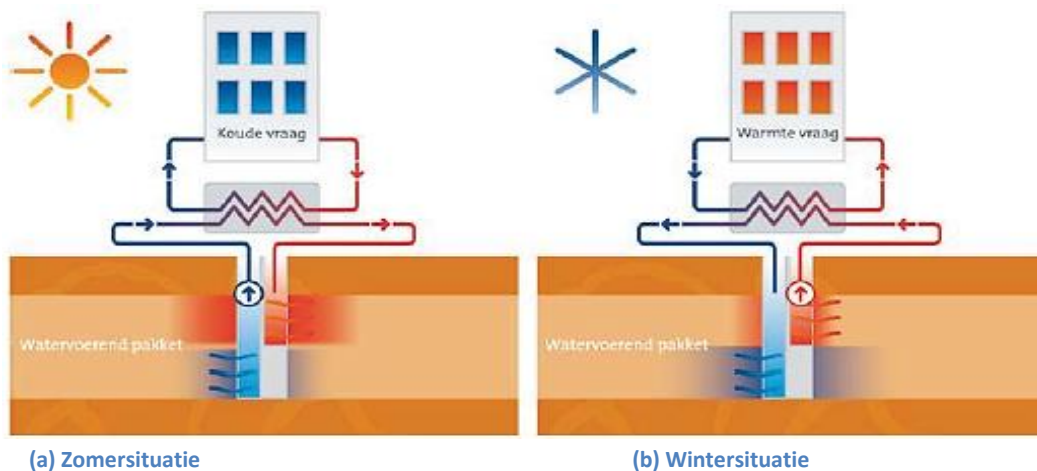
In de zomer is er vraag naar koude en zal water uit de koude bron worden onttrokken. Het koude water wordt naar een warmtewisselaar gepompt, waar de koude wordt overgedragen aan het koelsysteem van de gebruiker. Hierbij geeft het verpompte grondwater haar koude af en neemt het warmte van het gebouw op. Zo houdt men warm water over wat vervolgens wordt opgeslagen in de warmtebron. In de winter draait de stroming om en is er juist vraag naar verwarming. Hiervoor zal water uit de warmtebron worden onttrokken. Vaak is de temperatuur van de warmtebron echter nog te laag voor verwarmende doeleinde. Het water moet dan eerst doormiddel van een warmtepomp worden opgewaardeerd naar een hoger temperatuurniveau. Een warmtepomp bestaat uit een gesloten circuit met aan één kant een condensor en aan de andere kant een verdamper. Door onttrekking van thermische warmte uit het grondwater ontstaat gelijktijdig warmte en koude. De warmte wordt aan de verwarmingsinstallatie afgegeven en de koude wordt opgeslagen in de koudebron. In een bron vindt dus op seizoensbasis opslag dan wel onttrekking plaats.

De warmte en koude bron kunnen op twee verschillende manieren worden geconfigureerd. Men kan ervoor kiezen om deze horizontaal of verticaal naast elkaar te plaatsen.



### 2.3.2.1 Monobron

Bij een monobron worden de warmte en koude bron boven elkaar geplaatst, weergegeven in figuur 2. Vanwege dichtheidsverschillen wordt de warmtebron boven de koudebron geplaatst. Het grote voordeel van een monobron is dat maar één bronlocatie nodig is. Dit vermindert boringskosten en minimaliseert het bodemgebruik. Daarnaast kunnen meerdere monobronnen dicht naast elkaar worden geplaatst zonder dat de prestatie negatief beïnvloed wordt. Nadeel is dat er geen algemene regel toepasbaar is voor het design van een monobron. Het ontwerp wordt bepaald door lokale bodemparameters.

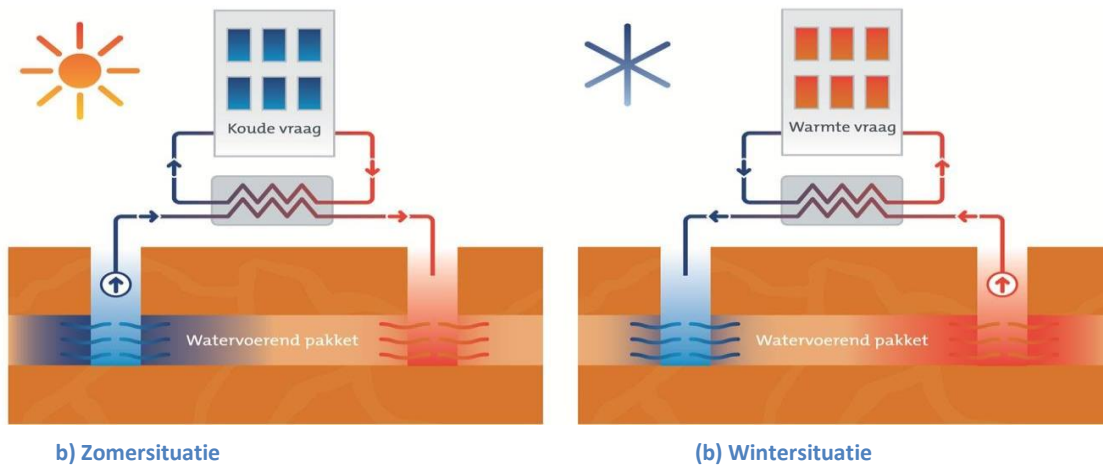


**Figuur 2.2: Werking van een monobron.** In de zomer wordt er koud water onttrokken en warm water opgeslagen. In de winter wordt warm water onttrokken en koud water opgeslagen. Bron: Materplan open bodemenergiebronnen De Dam I

Monobronnen kunnen een maximaal debiet van ongeveer 50 m<sup>3</sup>/h behalen en zijn van toepassing op kleine kantoren en woningbouw (SKB, 2013). Het maximaal haalbare debiet hangt echter per situatie af en wordt voornamelijk beïnvloed door de bodemgesteldheid. In het algemeen geldt dat in een dikke zandlaag meer opslag kan plaatsvinden wat een hoger haalbaar debiet geeft.

### 2.3.2.2 Doublet

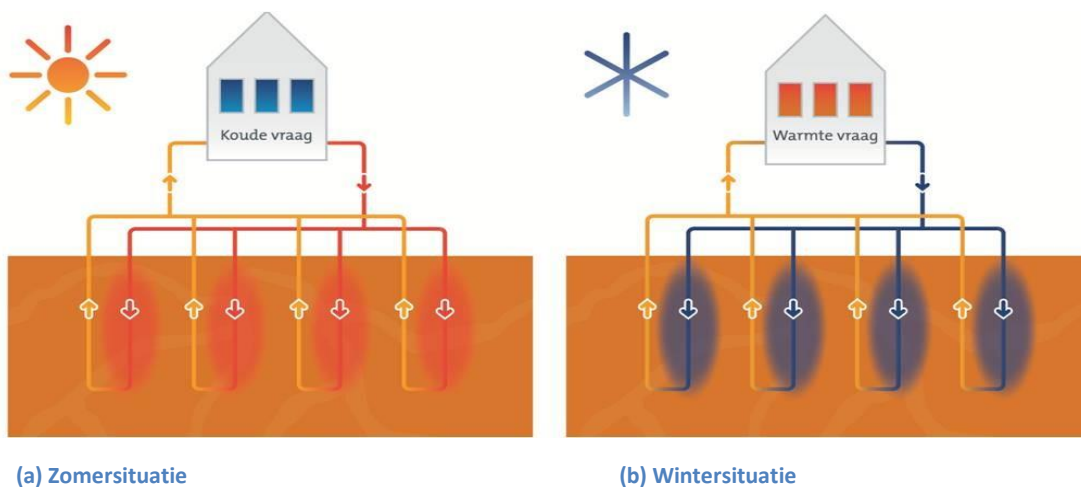
De werking van een doublet is hetzelfde als bij monobronnen, echter liggen de warmte en koude bron nu naast elkaar in het watervoerend pakket. Voordeel is dat beide bronnen over de gehele dikte van het watervoerend pakket gebruik kunnen maken. Dit zorgt ervoor dat grotere bronnen gecreëerd kunnen worden waarin een grotere hoeveelheid koude en warmte kan worden opgeslagen. Nadeel is dat doublet systemen veel ruimte in gebruik nemen. Tussen de bronnen dient een afstand van 3 maal de thermische straal aan te worden gehouden zodat deze elkaar thermisch niet beïnvloeden (NVOE, 2006).



Figuur 2.3: Werking van doublet. Opslag van warm water en onttrekking van koud water in de zomer. Opslag van koud water en onttrekking van warm water in de winter. Bron: Materplan open bodemenergiebronnen De Dam I

## 2.4 Gesloten bron

Indien geen geschikte watervoerende laag beschikbaar is of de kosten te hoog liggen kunnen gesloten systemen een geschikt alternatief zijn (Bridger en Allen, 2005). Hierbij worden lussen in de grond geplaatst, te configureren in horizontale richting, verticale richting of in de vorm van een spiraal. Door de leiding wordt een medium gepompt wat via geleiding warmte of koude uit de bodem onttrekt. In contrast met open bronnen wordt er geen gebruik gemaakt van verplaatsing van grondwater (NVOE, 2006).



Figuur 2.4: Werking van gesloten systemen. In de zomer vindt opslag van warmte en onttrekking van koude in de bodem plaats. In de winter draait de stroming om en vindt er opslag van koude en onttrekking van warmte uit de bodem plaats. Bron: Materplan open bodemenergiebronnen De Dam I

### 3. Theoretische achtergrond

Dit hoofdstuk gaat in op de processen die rondom een monobron en tussen de warme- en koude bel plaats vinden. In 3.1 wordt besproken welke bodemeigenschappen van invloed zijn op monobronnensystemen. Paragraaf 3.2 gaat in op de aspecten die warmteverlies veroorzaken. 3.3 behandelt hoe de vraag van gebruiker de systeemdimesies beïnvloed.

#### 3.1 Bodemparameters

##### 3.1.1 Geschikt watervoerend pakket

Voor de toepassing van monobronnen zal een geschikt watervoerend pakket aanwezig moeten zijn. Het watervoerend pakket moet aan verschillende eisen voldoen.

Als de warmte en koude bron dicht bij elkaar liggen kan onderling kortsluitingsstroming voorkomen . Dit veroorzaakt een daling van temperatuur in de warme bel en een opwarming van de koude bel. Opgeslagen energie gaat zo verloren wat resulteert in een afname van het te behalen rendement. Om menging van de bellen te voorkomen is een watervoerend pakket van voldoende dikte gewenst. Zo kan de benodigde scheidingsafstand tussen de bronnen worden toegepast. Daarnaast moet het watervoerend pakket begrensd worden door een scheidende isolerende laag aan boven- en onderkant. Zo wordt afstroming van opgeslagen warmte of koude naar omliggende watervoerende pakketten voorkomen .

##### 3.1.2 Porositeit

Een grondlaag bestaat uit een opeenstapeling van vele korrels. Doordat deze korrels niet precies op elkaar aansluiten ontstaan ruimtes in het korrelskelet. Deze ruimtes, ook wel poriën genoemd, kunnen gevuld zijn met water en/of lucht. De verhouding tussen het totale volume ( $V_V$ ) en de poriën ( $V_T$ ) wordt aangeduid door de porositeit  $n$ :

$$n = \frac{V_V}{V_T} \quad (3.1)$$

De korrelgrootte, sortering van de korrels en de korrelvorm is per sediment verschillend. Hierdoor is de porositeit per grondlaag verschillend. Indicatieve waardes voor de porositeit per sediment zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 3.1: Porositeit per sediment. Bron: Bear (1972)

Sedimenten	Porositeit (%)	Sediment	Porositeit (%)
Veen	60-80	Fijn tot matig fijn zand	30-35
Aarde	50-60	Grind	30-40
Klei	45-55	Grind en zand	30-35
Slib	40-50	Zandsteen	10-20
Grof tot matig grof zand	35-40	Leisteen	1-10
Uniform zand	30-40	Kalksteen	1-10

Een watervoerende pakket in Nederland bestaat voornamelijk uit een opeenstapeling van zandlagen. Uit tabel 1 kan worden afgeleid dat de porositeit van zand tussen 40%-30% ligt. Voor berekeningen in dit rapport zal gewerkt worden met een porositeit van 0.35.

### 3.1.3 Doorlatendheid

De doorlatendheid is de mate waarmee water door een bepaalde grondlaag kan stromen. Op basis van grondmonsters kan de doorlatendheid berekend worden met de Kozeny-Carman vergelijking:

$$k = \frac{\rho_w g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{(D50)^2}{180} 10^{-12} \quad (3.2)$$

$k$  = doorlatendheid [m/s]

$\rho_w$  = dichtheid van water [kg / m<sup>3</sup>]

$g$  = valversnelling [m / s<sup>2</sup>]

$\mu$  = dynamische viscositeit [Ns / m<sup>2</sup>]

$n$  = porositeit [-]

$D50$  = gemiddelde korrelgrootte [um]

De waarden voor de dynamische viscositeit en dichtheid van water zijn afhankelijk van de grondwatertemperatuur. Bij KWO systemen bedraagt de temperatuurverschil tussen de bronnen ongeveer 10 °C. Dit levert verwaarloosbare veranderingen in dichtheid en dynamische viscositeit op. Uit formule (3.2) valt zo te concluderen dat verschil in doorlatendheid hoofdzakelijk bepaald wordt door de gemiddelde korrelgrootte.

Door heterogeniteit van het watervoerend pakket is de gemiddelde doorlatendheid richtingsafhankelijk. Horizontale stromingen verplaatsen zich door eenzelfde grondlaag terwijl verticale stromingen verschillende grondlagen penetreren. Als gevolg hiervan is de verticale hydraulische weerstand groter dan de horizontale hydraulische weerstand. Dit leidt tot een lagere waarde van doorlatendheid in verticale richting. Via de Wet van Darcy kan een gemiddelde waarde van horizontale- en verticale doorlatendheid over het watervoerend pakket bepaald worden:

$$k_h = \frac{\sum(K_{xi} * d_i)}{\sum d_i} \quad (3.3)$$

$$k_v = \frac{\sum d_i}{\sum d_i / K_{zi}} \quad (3.4)$$

De verhouding tussen horizontale- en verticale doorlatendheid wordt anisotropie genoemd, aangeduid met:

$$a = \frac{k_h}{k_v} \quad (3.5)$$

Voordat een systeem gerealiseerd wordt zal uit grondmonsters de anisotropie geschat moeten worden. Hierbij zijn vuistregels van toepassing. Er geldt dat de aanwezigheid van dunne kleilagen een hogere anisotropie waarden opleveren. In de praktijk varieert de  $k_h/k_v$  verhouding tussen de 2 – 10 (Hantush and Thomas, 1966). Echter is het lastig om op basis van grondmonsters de exacte grond karakteristieken te bepalen. Hierdoor wijkt de geschatte anisotropie waarde vaak af van de werkelijke anisotropie.

Pomptesten geven een betere schatting van de  $k_h/k_v$  waarde. Een constant debiet wordt over een tijdsperiode geïnfiltrerd en tegelijkertijd wordt het piezometrisch niveau op twee plekken gemeten. Zo is de grondwaterverplaatsing tussen de twee punten te bepalen. Met een vooraf bepaalde  $k_h$  uit grondmonsters valt zo de anisotropie af te leiden. Echter zijn pomptesten pas mogelijk nadat de put is gerealiseerd.

## 3.2 Warmtetransport

Tijdens de opslag van thermische energie zal warmtetransport met de omgeving optreden. De efficiëntie van een bron wordt gegeven door het verschil in opgeslagen en onttrekbare thermische energie. Het thermisch verlies van de bron is afhankelijk van de volgende factoren:

- Grondwaterstroming
- Conductie
- Warmtecapaciteit
- Dispersie

Daarnaast vindt ook warmtetransport door van straling plaats, echter kan dit verwaarloosd worden ten opzichte van het totale warmte verlies (Li, Yang & Yeh, 2010).

### 3.2.1 Grondwaterstroming

Natuurlijke grondwaterstromingen ontstaan door variaties in stijghoogte, veroorzaakt door neerslag, hoogteverschil in maaiveld en menselijke invloeden zoals infiltratie en onttrekking van grondwater. De grondwaterstroomsnelheid is afhankelijk van het verhang ( $i$ ), doorlatendheid ( $k$ ) en porositeit ( $n$ ), gegeven door de formule:

$$v = \frac{ki}{n} 365 \quad (3.6)$$

$v =$  grondwaterstroomsnelheid [m/a]

$k =$  doorlatendheid [m/d]

$$i = \frac{dh}{dx}$$

Het verhang is de gradiënt van de stijghoogte in horizontale stroomrichting. Advectie zorgt ervoor dat het thermisch front in de richting van de grondwaterstroming verplaatsen.

### 3.2.3 Conductie

Conductie is het warmtetransport dat plaats vindt door warmtegeleiding. Dit wordt veroorzaakt door verschil in temperatuur. Met de formule van Fourier kan de warmtestroom voor geleiding berekend worden:

$$q_x = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.7)$$

$q_x = \text{warmtestroom door conductie} [W/m]$

$\lambda = \text{warmtegeleidingscoëfficiënt van het watervoerend pakket} [W/(m^\circ C)]$

$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \text{temperatuurgradiënt} [^\circ C/m]$

Conductie vindt aan het oppervlak van het thermisch front plaats. Een compacte vorm gaat gepaard met een afname aan conductie verliezen.

### 3.2.2 Warmtecapaciteit

Thermische energie wordt in de bron opgenomen door zowel het korrelskelet als het grondwater. De warmtecapaciteit geeft aan hoeveel warmte een medium kan opnemen. Op basis van de warmtecapaciteit van water en het korrelskelet kan de warmtecapaciteit van het watervoerend pakket worden berekend (NVOE, 2006):

$$c_a = n c_w + (1 - n) c_r \quad (3.8)$$

$c_a = \text{warmtecapaciteit aquifer} [J/(m^3 K)]$

$c_w = \text{warmtecapaciteit water} [J/(m^3 K)]$

$c_r = \text{warmtecapaciteit korrelskelet} [J/(m^3 K)]$

$n = \text{porositeit} [-]$

Als gevolg van energieopslag in het korrelskelet zal het thermisch front zich langzamer verplaatsen dan de grondwatersnelheid (Dickinson et al., 2008). De verhouding tussen de snelheid van het thermisch front en de snelheid van het water wordt gegeven door (Schaetzle et al., 1980):

$$\frac{V_w}{V_{th}} = \frac{c_a}{c_w} = R \quad (3.9)$$

De retardatiefactor R geeft aan in hoeverre de verplaatsing van het thermisch front vertraagd is ten opzichte van de grondwatersnelheid. In een watervoerend pakket in Nederland ligt deze waarde rond 2.0 (Xynogalou, 2015).

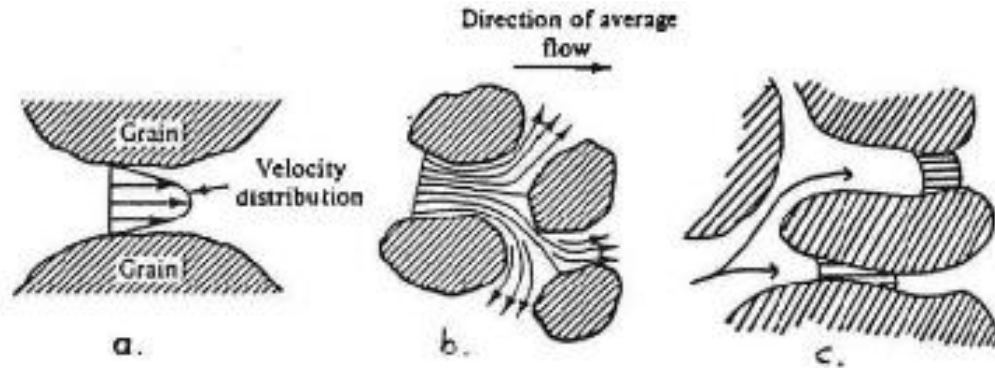
Convectie is een combinatie van advection en conductie, waarbij thermische energie van het korrelskelet wordt afgegeven aan het stromende water. Convectie speelt een grote rol op het totale warmteverlies maar wordt vertraagd door de retardatiefactor.

### 3.2.4 Dispersie

Door de heterogeniteit van het watervoerend pakket ontstaan variaties in lokale stroomsnelheden en stromingsrichting ten opzichte van de gemiddelde stroming. Deze variaties beïnvloeden het warmtetransport en ontstaan door:

- a) Verschil in stroomsnelheid binnen een porie: De stroomsnelheid is het hoogst in het centrum van de porie en minder snel aan de randen van de porie, waar frictie met de korrels wordt ondervonden.

- b) Vertakking van stroomlijnen door porie onregelmatigheden: Het grondwater kan zich alleen door de poriën verplaatsen en zal dus om de korrels heen stromen.
- c) Verschil in doorlatendheid tussen grondlagen: Grondwaterstromingen zoeken de makkelijkste weg en heeft daarom de neiging om naar hogere doorlaatbare lagen te stromen.



Figuur 3.1: (a) Stroomsnelheid distributie in een porie. (b) Vertakking van stroomlijnen door heterogeniteit in de poriën. (c) Stroming loopt van slecht doorlatende laag naar een goed doorlatende laag. Bron: Bear, 1972

Dispersie is voornamelijk verantwoordelijk voor de uitsmering van het thermisch front. Hierdoor treedt menging met de omgeving op.

### 3.3 Systeem parameters

De gebruiker bepaalt de vraag naar verwarming en koeling. Het systeem zal een vermogen moeten leveren om aan de energiebehoefte te voldoen. Het vermogen is afhankelijk van de het debiet  $Q$ , temperatuurverschil tussen de bronnen  $\Delta T$ , soortelijke warmte van water  $c_w$  en de dichtheid van water  $\rho_w$ , gegeven door:

$$P = Q\Delta T c_w \rho_w \quad (3.10)$$

Het benodigde vermogen bepaald de capaciteit en daarmee de dimensies van het systeem. De dimensies van een systeem zijn onder te verdelen in:

- Pompcapaciteit ( $Q$ )
- Filterlengte ( $L$ )
- Verticale scheiding tussen de bronnen ( $d$ )

#### 3.3.1 Opslagvolume

Afhankelijk van het de injectieduur zal er een hoeveelheid water in het watervoerend pakket worden opgeslagen. Het vergunde volume is gelijk aan de hoeveelheid water die in een seizoen wordt opgeslagen, gegeven door :

$$V = Q t_{v\text{ollast}} \quad (3.12)$$

Warmteverliezen vinden plaats via het oppervlak van het thermisch front. De vorm van het thermisch front komt overeen met het volume van een bol. Bij een verdubbeling in het opslag volume zal het oppervlak met een kleinere factor toenemen. Er geldt dus dat voor een hoger opslagvolume een beter rendement behaald kan worden.

### **3.3.2 Filterlengte**

Bij opslag van thermische energie zal er een bel rondom het filter ontstaan waarin zich de opgeslagen warmte of koude bevindt. De vorm van de bel wordt bepaald door de lengte van het filter ( $L$ ) en het vergunde volume ( $V$ ).

Bij een kleine  $V/L$ -ratio zal de bel zich voornamelijk in horizontale richting uitstrekken. Dit veroorzaakt een hele platte bel met een hoog contactoppervlak tussen boven- en onderliggende lagen. Hierdoor worden warmteverliezen voornamelijk door verticaal warmtetransport bepaald en zal conductie overheersen. Bij een hoge  $V/L$ -ratio strekt de bel zich voornamelijk in verticale richting uit. Dit resulteert in een hoog zijwaarts oppervlak waardoor warmteverliezen gedomineerd zullen worden door dispersie en convectie. Theoretisch zal er een optimale verhouding bestaan tussen  $L$  en  $V$  waar de totale warmteverliezen worden geminimaliseerd.

Daarnaast is vorm van de bel ook van invloed op de injectiedruk. Hypothetisch gezien zal een langer filter resulteren in een lagere injectiedruk. Dit zal de aantrekkingskracht tussen de bellen verminderen.

### **3.3.3 Verticale scheidingsafstand**

Gelijktijdige onttrekking en opslag veroorzaakt drukveranderingen in de bronnen. Grondwater verplaatst zich van een hoge druk naar een lage druk. Bij deze verplaatsing zal het thermisch front met vertraging mee worden verplaatst. Om menging van de warmte- en koude bel te voorkomen zal een verticale scheiding tussen de bronnen aangehouden moeten worden.



## 4. Onderzoeksmethode

Dit onderzoek is opgesteld om een correlatie tussen bodemparameters en systeemdimensies van een monobron te vinden. Specifiek zal worden onderzocht welke minimale verticale afstand tussen de warmte- en koude bron moet worden toegepast. Xynogalou (2015) heeft hier al eerder onderzoek in gedaan, waarbij onderzocht is wat de optimale verticale scheidingsafstand voor GT10, GT15 en GT25 systemen<sup>1</sup> bedraagt. Dit onderzoek zal zich richten op een breder assortiment waarbij een capaciteitsrange van 2.5 – 50 m<sup>3</sup>/h wordt aangehouden<sup>2</sup>.

Om de optimale verticale afstand te bepalen zal eerst de stijghoogteverandering berekenen moeten worden waarna de stroomsnelheid van het thermisch front bepaald kan worden.

### 4.1 Stijghoogteverandering

Bij een monobron treedt gelijktijdig opslag en onttrekking in de bronnen plaats. De stijghoogte gradiënt is afhankelijk van het onttrekkingsdebiet, filterlengte, filterdiameter en horizontale doorlatendheid. Thiem heeft een relatie gevonden tussen de stijghoogteverandering en de stijghoogte gradiënt (NVOE, 2006):

$$\Delta h = \frac{Q}{2\pi T} \ln\left(\frac{r_i}{r_w}\right) \quad (4.1)$$

*met  $T = k_h L$*

In de formule wordt Q gegeven door pompcapaciteit [m<sup>3</sup>/h], T staat voor de transmissiviteit [m<sup>2</sup>/d],  $r_i$  wordt gegeven als de straal van invloed en  $r_w$  is de straal van de put. De straal van invloed kan omschreven worden als de radiale afstand waarvoor geldt dat de stijghoogteverandering een verwaarloosbare invloed heeft. Voor de straal van invloed en de straal van de put worden dezelfde waardes als in het onderzoek van Xynogalou (2015) aangenomen, respectievelijk  $r_i = 1000 \text{ m}$  en  $r_w = 0.4 \text{ m}$ .

Om de stijghoogteverandering analytisch te kunnen berekenen zal de situatie rondom monobronnen enigszins moeten worden versimpelt. De volgende aannames zijn van toepassing:

- *Q is constant over tijd en gelijk aan  $Q_{pomp}$* : De vraag is constant over tijd
- *Er vindt alleen horizontale stroming van en naar het filter plaats*: De transmissiviteit (T) wordt alleen over de filterlengte berekend. In werkelijkheid treedt ook af- en toestroming van en naar het filter plaats, waardoor de stijghoogteverandering lager uitvalt
- *Het watervoerend pakket is homogeen en alleen anisotroop in verticale en horizontale richting*: In horizontale richting treedt uniforme grondwaterstroming op

---

<sup>1</sup> GT voor GeoThermic, een monobronstelsel dat geleverd wordt door GeoComfort. Het getal geeft de pompcapaciteit (m<sup>3</sup>/h) van het systeem aan.

<sup>2</sup> Vergelijkbaar met de capaciteitsrange die door GeoComfort voor monobronnen geleverd wordt

## 4.2 Stroomsnelheid thermisch front

Door de stijghoogteverandering zal het thermisch front zich met een verticale snelheid verplaatsen. Op basis van de verplaatsingsnelheid zal een bepaalde scheiding tussen de bronnen aangehouden moeten worden waarvoor geldt dat geen menging binnen de cycli optreedt. De grondwaterverplaatsing kan worden afgeleid uit de Wet van Darcy:

$$v_w = k_v * \frac{\Delta h}{\Delta z} \quad (4.2)$$

De stijghoogteverandering in de infiltratiebron is  $+\Delta h$  en in de onttrekkingsbron  $-\Delta h$ , de totale stijghoogteverandering tussen de warme en koude bel bedraagt dus  $2\Delta h$ . Daarnaast verplaatst het thermisch front zich met een factor  $R$  langzamer dan het grondwater. Zo kan (3) worden omschreven naar:

$$v_{th} = \frac{k_v}{R} * \frac{2\Delta h}{d} \quad (4.3)$$

$v_v =$  verticale snelheid van het thermisch front [m/d]

$k_v =$  Gemiddelde verticale doorlatendheid [m/d]

$R =$  retardatiefactor [-]

$\Delta h =$  stijghoogte verandering tussen de bronnen [m]

$d =$  verticale afstand tussen de bronnen [m]

De minimale scheiding die tussen de bronnen moet worden aangehouden is gelijk aan de afstand die het thermisch front binnen een seizoen aflegt. Dit is tevens de optimale verticale scheiding:

$$d = v_{th} \frac{t}{24} \quad (4.4)$$

$d =$  verticale scheiding [m]

$v_{th} =$  snelheid thermisch front [m/d]

$t =$  vollast uren per seizoen [h]

## 4.3 Modelling

De modellering bestaat uit twee fases. Eerst zal de optimale verticale afstand voor verschillende systemen worden gesimuleerd. Diversiteit tussen de systemen ontstaat door variatie in pompcapaciteit, anisotropie en filterlengte. Het aantal vergunde uren in een seizoen wordt constant gehouden. Vervolgens wordt er gekeken naar de optimale filterlengte van een monobron. De optimale filterlengte zal op twee verschillende uitgangspunten worden getoetst:

- 1) Minimale systeemplengte: In werkelijkheid is er maar een beperkte dikte beschikbaar om een monobronstelsel te realiseren. Doormiddel van de designformule voor minimale systeemplengte kan de bovengrens van het opslag volume in het watervoerend pakket bepaald worden
- 2) Minimale warmteverliezen: Zoals in 3.3.2 besproken is de vorm van de thermische bel van invloed op het totale warmteverlies op de omgeving. De designformule voor minimale

warmteverliezen geeft weer voor welke systeemparemeters het warmtetransport naar de omgeving zo laag mogelijk is

#### 4.3.1 Optimale verticale scheiding

Een combinatie van vergelijking (4.1), (4.3) en (4.4) levert een directe relatie tussen het volume, filterlengte en anisotropie op:

$$d = \sqrt{\frac{V}{\pi L} * a * \ln\left(\frac{r_i}{r_w}\right) * \frac{1}{R}} \quad (4.5)$$

Op basis van vergelijking (4.5) zal de optimale verticale afstand gesimuleerd worden onder een variërend volume, filterlengte en anisotropie. Vervolgens worden gekeken of bestaande monobronsystemen overeenkomen met de theoretische optimale verticale scheiding. Hiervoor is data van Installect gebruikt. De data is terug te vinden in Appendix A.

#### 4.3.2 Designformule: minimale systeemplengte

In de praktijk wordt de toepassing van monobronsystemen gelimiteerd door de dikte (D) van een watervoerend pakket. De designformule voor minimale systeemplengte geeft het maximaal realiseerbaar opslagvolume in het watervoerend pakket weer. De systeemplengte wordt gegeven door:

$$D = 2L + d \quad (4.6)$$

Er zal worden onderzocht welke filterlengte bij een bepaald volume moet worden toegepast om aan de designformule te voldoen.

#### 4.3.3 Designformule: minimale warmteverliezen

Warmteverliezen zijn afhankelijk van de vorm van de thermische bel. Droughty et al. (1982) heeft onderzocht hoe de verhouding tussen de thermische straal en het filterlengte warmteverliezen van bodemenergiesystem beïnvloed. Het totale warmteverlies is minimaal bij een R/L-ratio van 1.5 (Droughty et al., 1982). De formule voor de thermische straal wordt gegeven door:

$$R_{th} = \sqrt[3]{\frac{3c_a V}{2c_w \pi}} \quad (4.7)$$

Substitutie van  $R_{th} = 1.5L$  in de bovenstaande vergelijking geeft:

$$L = c \sqrt[3]{V} \quad (4.8)$$

Hierin is c afhankelijk van de warmtecapaciteit van het watervoerend pakket. In Nederland zal de waarde van c rond de 1.0 liggen.

#### 4.3.4 Parameters

De modellering wordt toegepast op systemen opererend op een constant aantal vollast uren per seizoen,  $t=2000$  uren. Voor de pomp wordt een capaciteitsrange van 2.5 – 50 m<sup>3</sup>/h aangehouden. Er zal dus gemodelleerd worden met een vergund volume van 5.000 – 100.000 m<sup>3</sup>. Daarnaast zullen drie verschillende geologische situaties onderzocht worden, overeenkomend met anisotropie 2, 5 en 10. De gebruikte parameters zijn samengevat in tabel 2.

Tabel 4.1: Samenvatting van de gebruikte parameters voor de modellering

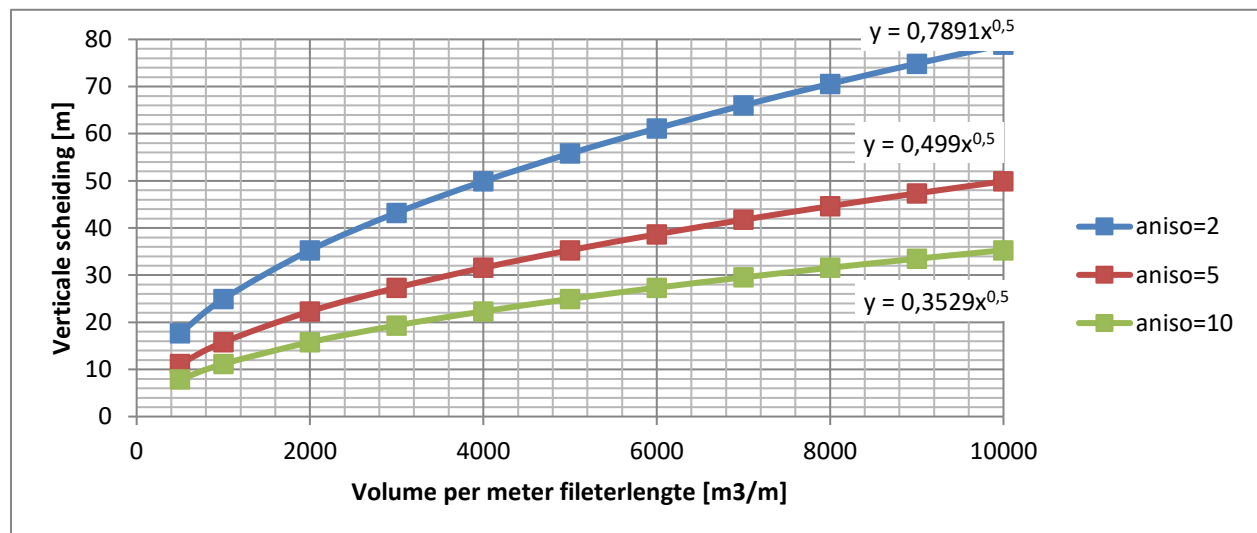
Parameter	Symbool	Waarde	Eenheid
Pompcapaciteit	$Q$	2.5 - 50	m <sup>3</sup> /uur
Straal van invloed	$r_i$	1000	m
Straal van de put	$r_w$	0.4	m
Vergunde uren per seizoen	$t$	2000	uren
Anisotropie	$a$	2, 5, 10	-
Filterlengte voor minimale systeemplengte	$L$	$(D-d)/2$	m
Filterlengte voor minimale warmteverliezen	$L$	$\sqrt[3]{V}$	m

## 5. Resultaten

### 5.1 Optimale verticale scheiding

De optimale verticale afstand is gesimuleerd onder een variërend volume, filterlengte en anisotropie. Om de drie verschillende parameters in één figuur weer te geven is er gekozen om op de horizontale as het volume per meter filterlengte uit te zetten. Op de verticale as is de bijhorende optimale verticale scheiding af te lezen. Het resultaat is weergegeven in figuur 5.1.

Uit figuur 5.1 is af te leiden dat de optimale verticale scheiding afhankelijk is van de anisotropie. Dit kan eenvoudig worden verklaart door het feit dat een hogere  $k_h/k_v$  verhouding resulteert in een lagere verticale snelheidsverplaatsing van het thermisch front. Dit gaat gepaard met een kleinere optimale scheiding. Aanwezigheid van kleilenzen hebben dus een gunstig effect op de benodigde verticale scheiding.

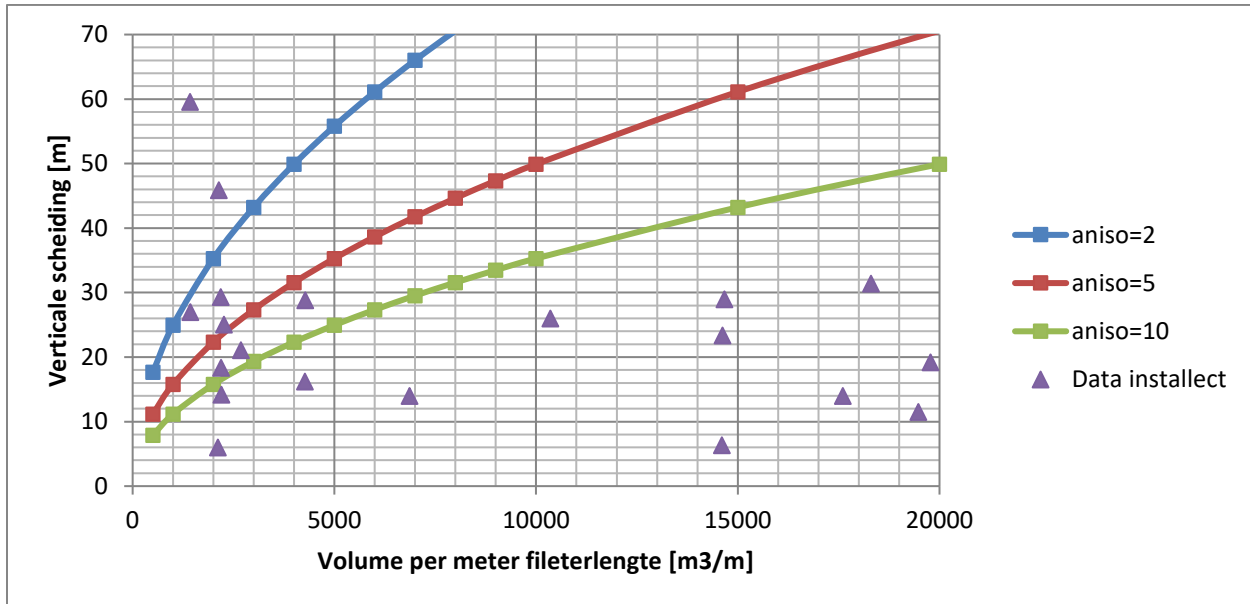


Figuur 5.3: Optimale verticale scheiding ten opzichte van volume per meter filterlengte. Elke lijn komt overeen met een verschillende anisotropie, weergegeven in de legenda. De formule van de corresponderende trendlijn is in de grafiek terug te vinden.

Daarnaast valt te concluderen dat de optimale verticale afstand afhankelijk is van de V/L-ratio. Het gewenste volume wordt bepaald door de energievraag van de gebruiker, een waarde die vooraf wordt vastgesteld. De keuze van de filterlengte is bij een bekende anisotropie-waarde de bepalende factor voor de benodigde verticale scheiding. Een kortere filter resulteert in een hogere V/L-ratio. Bij een toename in volume per meter filterlengte zal een hogere verticale scheiding gehanteerd moeten worden. Dit is te verklaren doordat een verhoging van de V/L-ratio gepaard gaat met een toename in stijghoogte.

## 5.2 Vergelijking theoretische waarden met bestaande cases

In figuur 5.2 is de V/L-ratio en de toegepaste verticale scheiding per systeem uitgezet samen met de theoretisch optimale scheiding. Voor een goede vergelijking is de anisotropie-waarde per systeem nodig. Echter wordt als bovengrens een anisotropie van 10 aangenomen.



Figuur 5.4 Toetsing van bestaande cases op de minimale verticale scheiding.

In figuur 5.2 is te zien dat de meeste systemen met een volume per meter filterlengte van onder de 5000 m<sup>3</sup>/m binnen de bandbreedte van de optimale scheiding vallen. Het lijkt er dus op dat deze systeem voldoende afstand hanteren.

Opvallend is dat voor systemen met een volume per meter filterlengte van boven de 5000 m<sup>3</sup>/m een kleinere verticale scheiding gehanteerd wordt dan van toepassing zou moeten zijn bij een hoge anisotropie. Theoretisch gezien betekent dit dat, indien geen hogere anisotropie dan 10 geldt, er menging tussen de bronnen zal optreden.

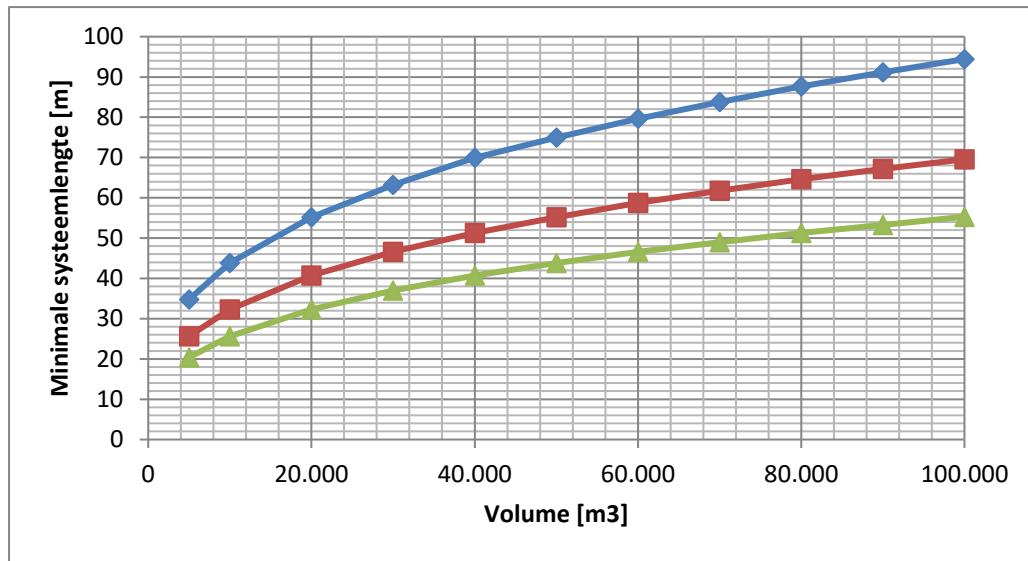
Echter is de theoretische waarde gebaseerd op een versimpeling van de werkelijkheid. Zo is aangenomen dat er bij infiltratie en onttrekking alleen horizontale stroming plaats vindt terwijl deze stroming in werkelijkheid ook een verticale component aan kan nemen. Dit zorgt voor een grotere spreiding van het opslagvolume en dus een lagere stijghoogteverandering.

## 5.3 Optimaal design: minimale systeemplengte

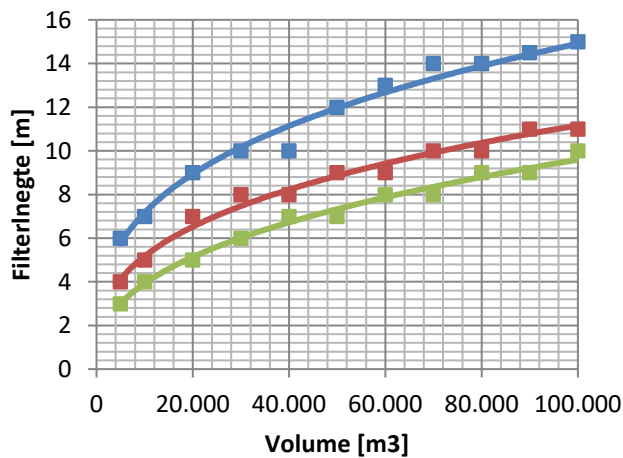
De resultaten van het onderzoek naar minimale systeemplengte is weergegeven in figuur 5.3. De filterlengte is in stapgrootte van 1 meter gevarieerd. Indien het minimum over twee filterlengtes verdeeld is werd gekozen voor de kleinste filterlengte. Dit verklaart de ongelijkmatig verloop van de grafiek in figuur 5.3 (b) en 5.3 (c).

In 5.3 (a) is voor een bepaalde dikte af te lezen welk volume toepasbaar is. De systeemplengte en het toepasbaar volume zijn met de derde macht wortel aan elkaar gecorreleerd. Daarnaast valt af te leiden dat een watervoerend pakket minimaal 35 meter dik moet zijn om een klein monobron systeem te kunnen toepassen.

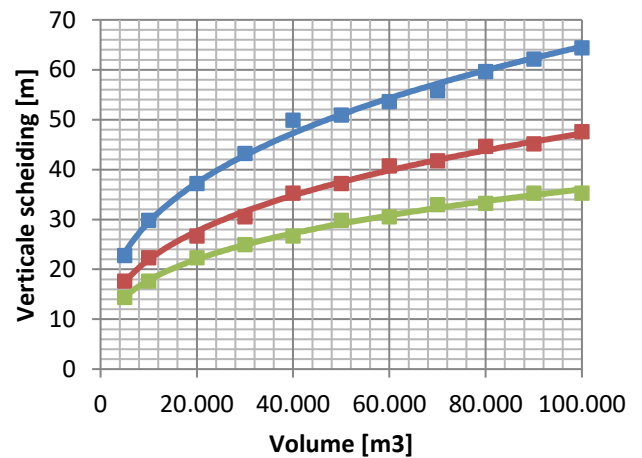
In figuur 5.3 (b) en (c) is de bijhorende filterlengte en verticale scheiding af te lezen. Hieruit valt te concluderen dat de systeemplengte voornamelijk door de verticale scheiding bepaald wordt.



(a) Minimale dikte watervoerend pakket per volume.



(b) Optimale filterlengte per volume



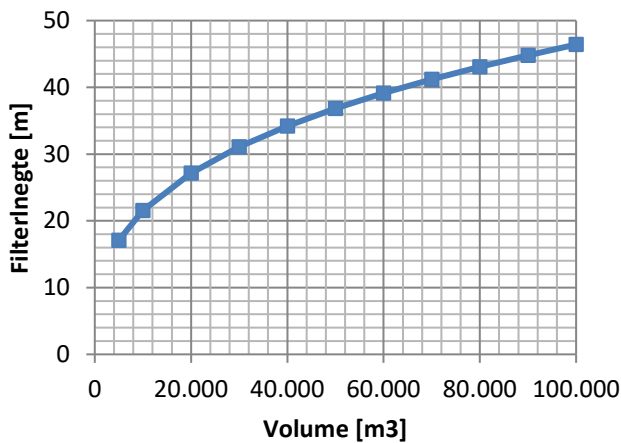
(c) Optimale verticale scheiding per volume

Figuur 5.3: Optimale design voor een minimale systeemplengte per volume. In (a) is weergegeven welk vergund volume realiseerbaar is binnen de beperking van de dikte. (b) geeft aan welke filterlengte per volume hiervoor moet worden aangehouden en (c) welke verticale scheiding moet worden toegepast. De blauw lijn komt overeen met de situatie waar een anisotropie 2 van toepassing is, rood geldt voor  $a = 5$  en groen voor  $a = 10$ .

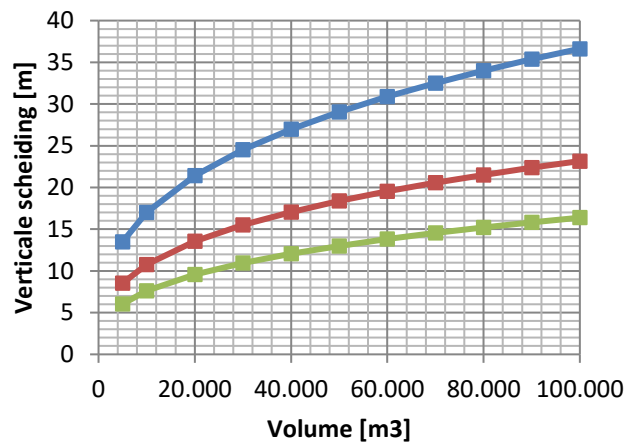
## 5.4 Optimaal design: minimaal warmteverlies

De thermische radius is onafhankelijk van de anisotropie. Dit betekent dat de vorm van de bel alleen afhankelijk is van het volume en de filterlengte. De systeem dimensies die per volume moeten worden toegepast zijn te vinden in figuur 5.4.

Opvallend is dat de filterlengtes een hoge waarde aannemen. Dit is ongunstig voor de totale kosten. Bij de dimensionering zal moeten worden overwogen of de toename in efficiëntie opweegt tegen de hoge kosten.



(a) Verticale afstande per volume



(b) Filterlengte per volume

Figuur 5.4: Optimale design voor maximale efficiëntie. (a) geeft aan welke scheiding per volume moet worden aangehouden en (b) welke filterlengte per volume moet worden toegepast. In (b) staat blauw voor  $a=2$ , rood voor  $a=5$  en groen voor  $a=10$ .



## 6. Conclusie

De bestaande designformule voor de verticale afstand tussen de warmte- en koudebron is alleen gebaseerd op het feit dat menging moet worden voorkomen. Er bestaat geen algemene waarde voor de benodigde verticale afstand, deze is per locatie verschillend.

Voor de optimale verticale scheiding geldt dat de benodigde afstand minimaal is. De optimale verticale scheiding is gelijk aan de afstand die het thermisch front in een seizoen aflegt. Doormiddel van simulatie van verschillende systemen is onderzocht welke bodemparameters en systeemdimensies van invloed zijn op de optimale verticale scheiding. Er volgt dat de anisotropie, filterlengte en vergund volume de snelheid van het thermisch front bepalen en zo de optimale scheiding beïnvloeden .

Monobronnen zijn gebaat bij een hoge anisotropie. Dit leidt tot een lagere verticale snelheid van het thermisch front waardoor een kleinere afstand tussen de bronnen kan worden aangehouden.

Een toename van het filterlengte zorgt voor een afname in stijghoogteverandering. De onderlinge aantrekkingskracht wordt zo verminderd wat resulteert in een lagere stroomsnelheid tussen de bronnen. Echter is in de praktijk het watervoerend pakket beperkt in dikte. Dit betekent dat de toepassing van systeemgrootte gelimiteerd is. Het optimale design voor minimale systeemplengte is opgezet te controle of een bepaald vergund volume haalbaar is. Op basis van het optimale design voor minimale warmteverlies kan het rendement van het systeem verder geoptimaliseerd worden.

In werkelijkheid is het niet rendabel om de filterlengte zo te kiezen opdat warmteverliezen geminimaliseerd worden. Dit brengt hoge kosten mee waardoor een systeem pas over lange duur kostrendabel wordt. Er zal een keuze gemaakt moeten worden tot welke mate warmteverliezen acceptabel zijn.

Systemen met een hoger vergund volume moeten een langere bronscheiding hanteren. Een verhoging van het volume gaat gepaard met een minder sterke toename in warmteverliezen. Er geldt dus dat voor grotere systemen een hoger rendement behaald kan worden.

## 7. Aanbeveling

De optimale verticale scheiding vertoont grote verschillen met bestaande cases die een hoog volume per meter filterlengte hanteren. In een vervolgstudie zal moeten worden onderzocht of de theoretische optimale scheiding ook opgaat voor grote V/L-ratio's of dat er anderen processen een dominante invloed aannemen.

Daarnaast heeft dit onderzoek bij mij een nieuwe vraag opgewekt: Hoe kan het design voor minimale warmteverliezen en het design voor minimale systeemplengte met elkaar gecombineerd worden? Beantwoording van deze vraag zal leiden tot het optimale monobron ontwerp. Een vervolgstudie kan hier uitkomst in bieden.

## Referentie

- Bear, J. (1972). Dynamics of fluids in porous media. Environmental science series (New York, 1972- ). New York: American Elsevier Pub. Co.
- Bloemendal, M., Olsthoorn, T., & Boons, F. (2014). How to achieve optimal and sustainable use of the subsurface for Aquifer Thermal Energy Storage. *Energy Policy*, 66, 104-114.
- Bridger, D. W., & Allen, D. M. (2005). Designing aquifer thermal energy storage systems. *Ashrae journal*, 47(9).
- CBS. (2010). Duurzame Energie in Nederland 2009.
- Dickinson, J. S., Buik, N., Matthews, M. C., & Snijders, A. (2009). Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. *Geotechnique*, 59(3), 249.
- Doughty, C., Hellström, G., Tsang, C. F., & Claesson, J. (1982). A dimensionless parameter approach to the thermal behavior of an aquifer thermal energy storage system. *Water Resources Research*, 18(3), 571-587.
- Hantush, M. S., and Thomas, R. G. (1966). A method for analyzing a drawdown test in anisotropic aquifers. *Water Resour. Res.*, 2(2), 281–285
- N.V.O.E. (2006). Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslagsystemen – Richtlijnen Ondergrondse Energieopslag. Woerden: NVOE.
- Li, K.-Y., Yang, S.-Y. & Yeh, H.-D. (2010). An analytical solution for describing the transient temperature distribution in an aquifer thermal energy storage system. *Hydrol. Process.*, 24: 3676–3688.
- Schaetzle, W. J., Brett, C. E., Grubbs, D. M. & Seppanen, M. S. (1980). Thermal energy storage in aquifers: Design and applications. New York: Pergamon
- SKB. (2013). Bodemenergie, warm aanbevolen.
- Taskforce WKO. (2009). Groen Licht voor Bodemenergie. Technical report
- Xynogalou, M. (2015). Determination of optimal separation well distance for single borehole ATES systems in the Netherlands, implementing an axisymmetric numerical model. Delft University of Technology, Delft.

## Appendix A: Data Instellect

Dim	m	m	m	[ ]	m3	m3	d	m3/d	m3/d	m	m3/h	m3/h	m				
Nr	name	L_screen	z1	z2	sep	porosity	Vcold	Vheat	nomalDays	QdCold	QdHeat	rw	QhCold	QhHeat	thermalRadius	V/L	D
3	GT15ULR	5.0	-44.0	-49.0	6.0	0.4	10562.3	10562.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	31.0	2112.5	16.0
25	GT20UG	4.8	-59.3	-64.1	29.3	0.4	10562.3	10562.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	31.5	2186.8	39.0
39	GT20CCU	4.8	-46.4	-51.2	18.4	0.4	10562.3	10562.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	31.6	2191.3	28.0
35	GT25RH	4.8	-45.0	-49.8	14.2	0.4	10562.3	10562.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	31.6	2195.9	23.8
17	GT25GV	14.5	-132.0	-146.5	59.6	0.4	20583.7	20583.7	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	25.4	1419.6	88.6
49	GT20WW	14.4	-105.0	-119.4	27.0	0.4	20583.7	20583.7	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	25.5	1425.5	55.9
41	GT25PV	9.6	-77.9	-87.5	45.9	0.4	20583.7	20583.7	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	31.2	2139.7	65.2
13	Gmini	9.1	-76.0	-85.1	25.1	0.4	20583.7	20583.7	116.7	716.4	176.4	0.3	7.4	7.4	42.1	2259.5	43.3
33	GT15KU	7.7	-133.5	#####	21.1	0.4	20583.7	20583.7	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	35.0	2687.2	36.4
9	GT25VA	4.8	-41.3	-46.1	16.2	0.4	20583.7	20583.7	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	44.1	4270.5	25.9
19	GT25TB	4.8	-64.3	-69.1	28.9	0.4	20583.7	20583.7	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	44.1	4279.4	38.5
51	GM121/2D	3.0	-26.0	-29.0	14.0	0.4	20583.7	20583.7	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	55.9	6861.2	20.0
37	GT15M	9.6	-51.4	-61.0	6.4	0.4	140825.6	140825.6	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	81.5	14608.5	25.6
31	GT20SM	9.6	-103.4	-113.0	23.4	0.4	140825.6	140825.6	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	81.5	14623.6	42.6
27	GT20WA	9.6	-69.0	-78.6	29.0	0.4	140825.6	140825.6	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	81.7	14669.3	48.2
45	GT25TBS	7.1	-49.9	-57.0	19.2	0.4	140825.6	140825.6	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	94.8	19778.9	33.4
23	GT20WVG	4.8	-44.7	-49.5	12.8	0.4	140825.6	140825.6	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	115.1	29156.4	22.4
1	GT10KEZ	4.8	-73.2	-78.0	21.1	0.4	140825.6	140825.6	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	115.1	29156.4	30.7
47	GT25-ZKPA	4.6	-41.0	-45.6	9.0	0.4	140825.6	140825.6	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	117.6	30415.9	18.3
11	GT40AA	17.0	-141.3	#####	26.0	0.4	176043.3	176043.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	66.6	10355.5	60.0
5	GM10HE	10.0	-47.0	-57.0	14.0	0.4	176043.3	176043.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	89.5	17604.3	34.0
21	GT20B1GB	9.6	-113.4	#####	31.4	0.4	176043.3	176043.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	91.2	18299.7	50.7
29	GT15PZC	9.0	-56.0	-65.1	11.5	0.4	176043.3	176043.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	94.1	19473.8	29.6
43	GT25NBDA	5.0	-46.0	-51.0	16.0	0.4	176043.3	176043.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	126.5	35208.7	26.0
7	GT20BA	5.0	-63.0	-68.0	16.0	0.4	176043.3	176043.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	126.5	35208.7	28.0
15	GT50CTA	4.8	-41.2	-46.0	11.5	0.4	176043.3	176043.3	116.7	720.0	720.0	0.4	30.0	30.0	128.9	36523.5	21.1