

Werkwijzen en richtlijnen ondergrondse energieopslag

Inhoudsopgave

1	Algemeen	4
1.1	Randvoorwaarden en uitgangspunten.....	4
1.2	Verschillende vormen van opslagsystemen	5
1.2.1	Koudeopslag, warmteopslag en energieopslag	5
1.2.2	Opslag/recirculatie	6
1.2.3	Monobron.....	7
1.3	Energetische uitgangspunten	8
1.3.1	Energiehoeveelheden.....	8
1.3.2	Thermische vermogens, temperaturen en debieten.....	8
2	Geohydrologie	10
2.1	Bodentechnische aspecten.....	10
2.1.1	Inleiding	10
2.1.2	Bodemopbouw.....	10
2.1.3	Grondwater en grondwaterstroming	13
2.1.4	Grondwaterkwaliteit en grondwatertemperatuur	15
2.1.5	Overige grondwaterwinningen.....	17
2.1.6	Bodem- en grondwaterverontreinigingen	18
2.1.7	Geohydrologisch onderzoek.....	20
2.2	Thermische aspecten	22
2.2.1	Bodemeigenschappen in relatie tot warmtetransport in de bodem en ontwerp- aspecten	22
2.2.2	Ontwerp in relatie tot thermische aspecten	27
2.3	Hydrologische aspecten	30
2.3.1	Ontwerp in relatie tot hydrologische aspecten	30
2.3.2	Modelberekeningen	32
2.3.3	Keuze watervoerend pakket.....	33
2.4	Effecten energieopslag.....	34
2.4.1	Hydrologische effecten	34
2.4.2	Zettingen	35
2.4.3	Thermische effecten	35
2.4.4	Effecten op grondwaterkwaliteit.....	35
3	Civiele techniek	37
3.1	Ontwerpcriteria bronnen	37
3.1.1	Bronontwerp	37
3.1.2	Injectiedruk, bodemsplijting, onderloopsheid, verstopping.....	38
3.2	Boren	40
3.2.1	Boortechnieken.....	40
3.2.2	Aandachtspunten tijdens uitvoering.....	42
3.2.3	Bemonstering tijdens boren en boorbeschrijving	44
3.3	Bronnen	45
3.3.1	Filterbuis, stijgbuis en pompkamer	45

3.3.2	Omstorting	48
3.4	Ontwikkelen bronnen	49
3.4.1	Verschillende ontwikkelmethodes	49
3.4.2	Beoordelen bronnen	51
3.5	Putbehuizingen	51
3.6	Overige uitvoeringszaken	53
3.6.1	Afvoer grond	53
3.6.2	Lozen van grondwater	53
4	Werktuigbouwkunde/elektrotechniek.....	54
4.1	Onderdelen grondwatersysteem	54
4.1.1	Algemeen.....	54
4.1.2	Pompkamer	55
4.1.3	Bronpomp	55
4.1.4	Persleiding	59
4.1.5	Injectievoorziening	59
4.1.6	Bronplaat/bronkop	59
4.1.7	Leidingwerk en appendages in de putbehuizing	60
4.1.8	Leidingwerk in het terrein.....	60
4.1.9	Techniekruimte	62
4.1.10	Onderhoudsvoorziening.....	63
4.2	Regeling.....	64
4.2.1	Algemeen.....	64
4.2.2	Randvoorwaarden	64
4.2.3	Regelprincipes	64
4.2.3.1	Vast debiet (aan/uit regeling)	64
4.2.3.2	Variërend debiet	65
4.2.4	Regelgrootheden	69
4.2.5	Regelprocedures	69
4.2.6	Beveiligingen	70
4.2.7	Registratie.....	71
4.3	Materiaalselectie	72
5	Literatuuroverzicht.....	73

Figuren:

1.1	Principe van energieopslag
1.2	Principe van energieopslag/recirculatie
1.3	Principe van opslag/recirculatie
2.1	Geohydrologische doorsnede door Nederland
2.2	Berekende temperatuurveranderingen in het opslagpakket na 20 jaar
3.1	Bron opbarsting
3.2	Bron ontwerp
4.1	Principeschema grondwatersysteem
4.2	Pompkamer

Foto's:

- 4.1 Persleiding met bronpomp
- 4.2 Bronkop
- 4.3 Het inbouwen van een pompkamer
- 4.4 Leidingwerk in de putbehuizing met meerdere injectieleidingen
- 4.5 Leidingwerk in de putbehuizing met een zelfregelend injectieventiel

1 Algemeen

In dit hoofdstuk wordt een algemene inleiding van het deel 'Werkwijze en Richtlijnen' gegeven. Hiervoor worden in paragraaf 1.1 de randvoorwaarden en uitgangspunten voor het document beschreven. Paragraaf 1.2 geeft een globale beschrijving van de vormen van opslagsystemen die in het deel 'Werkwijze en Richtlijnen' nader worden belicht. Ten slotte wordt in paragraaf 1.3 een algemene beschrijving van de energetische uitgangspunten gegeven op basis waarvan opslag(recirculatie)systemen worden gedimensioneerd.

1.1 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Deze algemene technische omschrijving van opslag/opslagrecirculatie in de bodem beperkt zich tot de volgende punten.

- Alleen het ondergrondse deel wordt besproken, waarbij het ondergrondse deel bestaat uit alles wat in aanraking komt met grondwater en datgene dat nodig is om dit circuit te bedienen, beveiligen, regelen en huisvesten. Het ondergrondse systeem wordt ook wel primair systeem genoemd en het circuit dat daarop zit aangesloten het secundaire systeem.
- Alleen opslag in de range van 0°C tot 30°C wordt besproken. Temperaturen boven de 30°C leiden mogelijk tot dichtheidsstroming (opdrijven van warmer (lichter) water), tot chemische veranderingen, andere materiaalselecties en tot meer problemen bij de vergunningverlening.
- Alleen opslag in Nederland wordt besproken. Buiten Nederland moet rekening gehouden worden met andere geohydrologische omstandigheden (bijvoorbeeld kalk aquifers) en andere juridische omstandigheden.
- Alleen opslag voor één gebruiker en opslag met één bronnenpaar wordt besproken. Opslag waarbij meerdere gebruikers en/of meerdere bronnen worden aangesloten, is aanzienlijk complexer. Dit stuk is met name bedoeld voor eenvoudige situaties.
- Dit stuk is niet uitputtend en pretendeert niet volledig te zijn. Het bevat een opsomming van de hoofdelementen die een rol spelen bij het ontwerpen, aanleggen en beheren van een ondergrondse energieopslag, met als belangrijkste doelen:
 - o het voorkomen dat partijen fouten maken die voortkomen uit onwetendheid;
 - o het vastleggen van de minimale eisen waaraan de kwaliteit van een energieopslagsysteem moet voldoen;
 - o ervoor zorg dragen dat de uiteindelijke opdrachtgever een goed functionerend systeem kan verwachten.

1.2 Verschillende vormen van opslagsystemen

1.2.1 Koudeopslag, warmteopslag en energieopslag

Onderscheid wordt gemaakt tussen opslag voor het leveren van:

- 1 alleen voor koeling (koudeopslag);
- 2 alleen voor verwarming (warmteopslag);
- 3 voor zowel koeling als verwarming (energieopslag).

De verschillen tussen deze typen opslagsystemen hebben consequenties voor de wijze waarop de opslag ontworpen wordt.

Zo zal bij een koudeopslag meer aandacht worden geschonken aan het thermisch rendement voor de koudeopslag en zijn warmteverliezen in de ondergrond gunstig voor het thermisch rendement. Het omgekeerde is waar bij warmteopslag (verliezen van koude zijn gunstig), terwijl bij energieopslag beide bewaard dienen te worden.

Principe

Bij opslagsystemen wordt het water heen en weer gepompt van de koude naar de warme bron en vice versa. In de zomer is de koude bron onttrekkingsbron en de warme bron infiltratiebron. In de winter is de situatie omgekeerd. Beide bronnen worden derhalve uitgevoerd als onttrekkings- en infiltratiebron.

De onttrekkingstemperatuur aan de koude bron is meestal lager dan de natuurlijke temperatuur en de onttrekkingstemperatuur aan de warme bron is meestal hoger dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Het principe van energieopslag is weergegeven in figuur 1.1.

Voor opslagsystemen worden de termen laden en ontladen gebruikt. In tabel 1.1 wordt per opslagsysteem een toelichting op deze termen gegeven.

Tabel 1.1 Toelichting op 'laden en ontladen' per opslagsysteem

Opslagsysteem	Laden	Ontladen
Koudeopslag	in winter koude aan de bodem toevoeren (warmte onttrekken)	in zomer koelen van het water in het secundaire circuit (warmte aan de bodem toevoegen)
Warmteopslag	in zomer warmte aan de bodem toevoeren (koude onttrekken)	in winter verwarming van het water in het secundaire circuit (koude aan de bodem toevoegen)
Energieopslag	bij voorkeur geen gebruik maken van de term laden of ontladen i.v.m. mogelijke verwarring. Gebruik koelen / verwarmen of warmtelevering / koudelevering of warmte toevoeren / onttrekken aan de bodem.	

Vergunningverlening

Over het algemeen dient bij opslagsystemen groter dan 10 m³/h een vergunning in het kader van de Grondwaterwet te worden aangevraagd (zie voor nadere uiteenzetting tab 'Wet- en regelgeving duurzame energiesystemen in de bodem'). Opslagsystemen zijn daarentegen uitgesloten van de volgende regelingen:

- 1 Lozingenbesluit van de Wet Bodembescherming;
 - 2 provinciale grondwaterheffing in het kader van de Grondwaterwet;
 - 3 belastingplicht in het kader van de Wet Belastingen op Milieugrondslag.
- Voor verdere uiteenzetting van de wet- en regelgeving bij opslag(/recirculatie)systemen wordt verwezen naar tab 'Wet- en regelgeving'.

1.2.2 Opslag/recirculatie

Principe

In tegenstelling tot opslagsystemen bestaat een opslag/recirculatiesysteem niet uit een koude en warme bron, maar uit een onttrekkings- en infiltratiebron. Bij opslag/recirculatie wordt het grondwater altijd één richting opgepompt: van de onttrekkingsbron naar de infiltratiebron. Een kenmerk van opslag/recirculatie is dat de temperatuur van het onttrokken grondwater in principe voortdurend gelijk is aan de natuurlijke grondwatertemperatuur.

Deze natuurlijke grondwatertemperatuur blijkt voldoende te kunnen zijn voor levering van koude ten behoeve van bijvoorbeeld proceskoeling in de industriële sector of voor levering van warmte ten behoeve van een warmtepompsysteem.

Na gebruik van het onttrokken grondwater wordt het grondwater vervolgens geïnfiltrerd. In de zomer is de temperatuur van het te infiltreren water warmer en in de winter kouder dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Het principe van opslag/recirculatie is weergegeven in figuur 1.2.

De voor- en nadelen ten opzichte van een opslagsysteem zijn in tabel 1.2 samengevat.

Tabel 1.2 Voor- en nadelen opslag/recirculatie ten opzichte van opslagsysteem

Voordelen	Nadelen
Eenvoudiger (en dus veelal goedkoper) te realiseren dan seizoenopslag	Groter risico aantrekken ander water (zie paragraaf 2.1.4 grondwaterkwaliteit)
Het is (indien gewenst) mogelijk bestaande onttrekkingsbronnen in het systeem in te passen	Eerder verstopping bronnen
	Meestal hoger debiet nodig voor zelfde vermogen en daardoor een groter energieverbruik

Vergunningverlening

Net als bij opslagsystemen dient voor opslag/recirculatiesystemen een vergunning in het kader van de Grondwaterwet te worden aangevraagd. Hierbij wordt opgemerkt dat sommige provincies voorschrijven dat de infiltratiebron bovenstrooms van de onttrekkingsbron dient te worden geplaatst.

Opslag/recirculatiesystemen, zoals bij 'principe' omschreven, zijn ook uitgesloten van de volgende regelingen:

- 1 Lozingenbesluit van de Wet Bodembescherming;
- 2 provinciale grondwaterheffing in het kader van de Grondwaterwet;
- 3 belastingplicht in het kader van de Wet Belastingen op Milieugrondslag.

Er bestaan ook recirculatiesystemen waarbij alleen koude of warmte in de bodem wordt geïnfiltrerd. De infiltratiebron is dan meestal benedenstrooms van de onttrekkingsbron geplaatst. Sommige provincies zullen hiervoor geen vergunning Grondwaterwet verlenen of aanvullende eisen stellen.

1.2.3 Monobron

Principe

Een zogenaamde 'monobron' is één boorgat waarin twee bronfilters zijn geplaatst: een koud en een warm bronfilter. De bronfilters doen dienst als twee aparte bronnen, zoals bij een opslag(recirculatie)systeem, met dit verschil dat de bronfilters verticaal uit elkaar zijn geplaatst in plaats van horizontaal. Uitgangspunt voor een monobron is dat beide bronfilters in één aquifer worden aangelegd. Ook een monobron kan als een opslag of een opslag/recirculatie worden uitgevoerd. Het principe van een monobron is weergegeven in figuur 1.3.

De voor- en nadelen van een monobron ten opzichte van een systeem waarbij één boring of twee boringen dicht naast de bronnen horizontaal uit elkaar zijn geplaatst, zijn weergegeven in tabel 1.3.

Tabel 1.3 Voor- en nadelen monobron t.o.v. een doublet (horizontaal uit elkaar geplaatste bronnen)

Voordelen	Nadelen
Kortere terreinleidingen	Kleilagen tussen bovenste en onderste filter nodig, anders relatief groot risico van kortsluiting
Slechts één bronlocatie nodig i.p.v. twee	Dikke aquifer nodig
Mogelijk goedkoper dan doublet	Bij verticale kwaliteitsgradiënt in aquifer eerder menging

Vergunningverlening

Ook voor het principe van een monobron, uitgevoerd binnen één aquifer, dient een vergunning in het kader van de Grondwaterwet te worden aangevraagd. Het systeem is tevens uitgesloten van de volgende regelingen:

- 1 Lozingenbesluit van de Wet Bodembescherming;
- 2 provinciale grondwaterheffing in het kader van de Grondwaterwet;
- 3 belastingplicht in het kader van de Wet Belastingen op Milieugrondslag.

Indien de bronfilters in twee verschillende aquifers worden geplaatst, zal een ontheffing in het kader van het Lozingenbesluit nodig zijn. Bovendien is het systeem belastingplichtig in het kader van de Wet Belastingen op Milieugrondslag, omdat het onttrokken grondwater in een ander watervoerend pakket wordt geïnfiltrerd dan waaruit is onttrokken. Hierbij wordt opgemerkt dat verlening van een vergunning Grondwaterwet door de provincies bij uitvoering over twee aquifers onzeker kan zijn.

1.3 Energetische uitgangspunten

1.3.1 Energiehoeveelheden

De hoeveelheid koude (E_k) en/of warmte (E_w) die wordt gevraagd, meestal uitgedrukt in MWh_{th} , is een uitgangspunt voor het ontwerpen van de opslag. Dit getal dient daarom door de opdrachtgever of zijn adviseur te worden toegeleverd. Dit geldt overigens voor alle energetische uitgangspunten. Er is een sterke interactie tussen de energetische uitgangspunten en het opslagontwerp. Daarom dienen deze uitgangspunten in nauw overleg tussen de ontwerper van het ondergronds systeem en de ontwerper van de 'bovengrondse' installatie te worden vastgesteld. In het geval van een koudeopslag dient de koudevraag in een gemiddeld jaar te worden vastgesteld. Vervolgens zal een inschatting van het te verwachten thermisch rendement gemaakt moeten worden (zie aldaar).

Op basis daarvan kan ingeschat worden hoeveel koude geladen moet worden in een gemiddeld (referentie)jaar. Op basis daarvan kan het benodigde laadvermogen berekend worden voor een gemiddelde winter. Hierbij dient een beslissing genomen te worden hoe omgegaan moet worden met niet gemiddelde winters en zomers. Een soortgelijk verhaal geldt voor een warmteopslag, maar dan zal de warmtevraag leidend zijn.

Voor een energieopslag is het meestal niet zo dat de koude- en warmtevraag aan elkaar gelijk zijn. De energiehoeveelheden in de bodem hoeven bij opslag niet altijd thermisch in balans te zijn (hoewel sommige provincies dat wel eisen). Technisch gezien moet wel rekening gehouden worden met deze onbalans. Onbalans heeft invloed op kortsluiting tussen de bronnen en op het te verwachten verloop van de onttrekkingstemperaturen. Indien noodzakelijk dienen secundaire voorzieningen opgenomen te worden om de opslag energetisch (meer) in balans te brengen.

De warmte- en koudevraag van de gebruiker is niet altijd gelijk aan de koude- en warmtevraag aan de opslag. Een deel van de koudevraag kan bijvoorbeeld gedekt worden door middel van koelmachines en een deel van de warmtevraag met ketels. Ook moet men er op bedacht zijn dat de warmtevraag van een warmtepomp aan de bodem door de toevoeging van elektrische energie kleiner is dan de warmtevraag van de gebruiker. Daarnaast kan er in het gebouw al uitwisseling plaatsvinden tussen koude- en warmtevraag.

1.3.2 Thermische vermogens, temperaturen en debieten

Het gevraagde koel- en verwarmingsvermogen (P_k resp. P_w) aan de opslag is, naast de hoeveelheid koude en warmte, een belangrijk uitgangspunt. Ook hiervoor geldt dat het koel- en verwarmingsvermogen van de gebruiker beslist niet overeen hoeft te komen met het gevraagde vermogen aan de bodem. De uitgangspunten die nodig zijn voor het ontwerp van de opslag is het gevraagde vermogen aan de bodem in de zomer en in de winter uitgedrukt in kW_t .

Met het vermogen en het aantal equivalente vollasturen kan de energiehoeveelheid worden berekend. Het gevraagde vermogen is om te rekenen naar de gevraagde energiehoeveelheid door middel van het aantal equivalente vollasturen (N_{eq}):

$$E_k = N_{eq,k} * P_k$$

$$E_w = N_{eq,w} * P_w$$

Het aantal equivalente vollasturen is sterk afhankelijk van het type gebruiker en van de inpassing van de opslag in het systeem. Wordt bijvoorbeeld alleen de basislast geleverd met de opslag, dan neemt het aantal equivalente vollasturen toe.

Om vermogens om te kunnen rekenen naar benodigde grondwaterdebieten is informatie nodig over de gevraagde en terug geleverde temperatuurniveaus. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de invloed die de opslag heeft op de te verwachten onttrekkingstemperaturen. Door warmtegeleiding, dispersie en grondwaterstroming treden er thermische verliezen op in de bodem. Dit heeft tot gevolg dat de onttrekkingstemperatuur uit een warme of koude bron afwijkt van de infiltratietemperatuur. Stel dat een koude bron in de winter wordt geladen met 7°C water. In de zomer zal in het begin nog water van circa 7°C onttrokken kunnen worden, maar gedurende de zomer zal de temperatuur van het grondwater dat onttrokken wordt aan de koude bron stijgen. De mate van stijging hangt van zeer veel factoren af (zie paragraaf 2.2).

Het gewenste grondwaterdebiet wordt bepaald door het vermogen en het (ontwerp-) temperatuurverschil tussen de bronnen.

$$P_t = q_{m,k} * c_w * \Delta T$$

P_t : koel- of verwarmingsvermogen [W]
 q_m : hoeveelheid water [kg/s]
 c_w : soortelijke warmte van water [J/(kg K)] = 4.200 J/(kg K)
 ΔT : temperatuurverschil [K]

Als de ontwerpsituatie voor de opslag bijvoorbeeld bestaat uit het leveren van 9°C water waarbij dan 17°C teruggeleverd wordt, bedraagt het debiet:

$$q_m = P_t / (4200 * 8) = 0,00003 * P_t$$

Als het debiet in m³/h wordt opgegeven, dan geldt:

$$q_v = P_t / (\Delta T * 1,16)$$

P_t : koel- of verwarmingsvermogen [kW]
 q_v : debiet [m³/h]

Aangezien de kosten van een opslagsysteem vooral door het maximale debiet bepaald worden, is het voor de financiële haalbaarheid van energieopslag van belang het temperatuurverschil zo groot mogelijk te maken. Dit kan het eenvoudigst door de retourtemperatuur voor koeling onder ontwerpcondities zo hoog mogelijk te maken (en voor verwarming zo laag mogelijk).

2 Geohydrologie

Hoofdstuk 2 is een weergave van alle geohydrologische aspecten die van belang zijn voor het globale ontwerp van een opslag(recirculatie)systeem. Paragraaf 2.1 gaat in op alle bodemtechnische aspecten zoals bodemopbouw, grondwaterstroming, grondwaterkwaliteit en bodemverontreinigingen. Tevens wordt ingegaan op belanghebbenden (bestaande winningen, natuur en landbouw) waarmee tijdens het ontwerp rekening moet worden gehouden. Gezien het feit dat bij opslag(recirculatie) met andere temperaturen wordt gewerkt dan de natuurlijke grondwatertemperatuur is het belangrijk om inzicht te hebben in het warmtetransport en de warmteverliezen die in de bodem optreden. Uiteindelijk is dit bepalend voor het thermisch rendement van een opslagsysteem. De aspecten die hierbij een rol spelen worden behandeld in paragraaf 2.2. Bij opslag(recirculatie)systemen wordt grondwater onttrokken en geïnfilteerd. Dit brengt grondwaterstands- en stijghoogteveranderingen met zich mee. Deze hydrologische aspecten komen in paragraaf 2.3 aan bod. Paragraaf 2.4 gaat in op alle (neven-)effecten die ten gevolge van een opslag(recirculatie)systeem in de omgeving van het systeem optreden. Inzicht hierin is van belang voor de vergunningverlening in het kader van de Grondwaterwet.

2.1 Bodemtechnische aspecten

2.1.1 Inleiding

Bij energieopslag wordt gebruik gemaakt van grondwater om koude en/of warmte in op te slaan. Het grondwater doet dienst als opslag- en transportmedium van koude en/of warmte. In het grootste deel van Nederland wordt grondwater op een diepte van enkele tientallen centimeters tot enkele meters onder maaiveld aangetroffen (de zg. freatische grondwaterstand). In de hooggelegen, gestuwde gebieden zoals op de Veluwe kan het voorkomen dat grondwater pas op een diepte van 20 m of meer onder maaiveld aanwezig is. Vanaf deze freatische grondwaterstand is de bodem volledig verzadigd met grondwater.

2.1.2 Bodemopbouw

De bodem in Nederland bestaat uit een opeenvolging van klei- en/of veenlagen en zandlagen (zie figuur 2.1). Klei- en/of veenlagen worden ook wel scheidende of weerstandbiedende lagen genoemd. Een gebruikelijke benaming voor de zandlagen is watervoerende pakketten (w.v.p. of aquifers). De bronfilters van een energieopslag worden altijd in een watervoerend pakket geplaatst. Hieronder volgt een uiteenzetting van kenmerken van scheidende lagen en watervoerende pakketten.

Scheidende lagen

Een kenmerk van scheidende lagen is dat grondwater zeer moeilijk door deze lagen kan stromen. De platte klei- en/of veendeeltjes zijn als het ware aan elkaar gekit, waardoor de ruimten tussen de deeltjes niet toegankelijk zijn. De doorlatendheid is zodanig klein dat stroming vrijwel niet aanwezig is. Over een scheidende laag kan wel grondwaterstroming plaatsvinden, zij het dat de stroming een zeer lage snelheid heeft. De drijvende kracht achter deze stroming is het drukverschil tussen het boven- en onderliggende watervoerende pakket.

Een veel gebruikte bodemparameter voor een scheidende laag is de weerstand. Deze wordt bepaald door de verhouding van de verticale doorlatendheid en de dikte van de laag. De weerstand heeft als eenheid 'dagen'. Opgemerkt wordt dat in de klei- en/of veenlagen (fijn) zand kan zijn ingesloten. Hierdoor wordt de weerstand van een scheidende laag enigszins verlaagd. Naar gelang de diepte kunnen de verschillende scheidende lagen worden onderscheiden door een deklaag en 1^e, 2^e en 3^e et cetera scheidende laag. Indien een deklaag aanwezig is, wordt deze altijd direct aan maaiveld aangetroffen.

Watervoerende pakketten

Watervoerende pakketten zijn lagen bestaande uit een opeenstapeling van zandkorrels. Deze zandkorrels kunnen in grootte variëren. Bij korrels met een kleine respectievelijk grote diameter wordt gesproken van fijn of grof zand. In tabel 2.1 is de korrelverdeling weergegeven.

Tabel 2.1 Korrelgrootteverdeling van zand (NEN-norm 5104)

Korrelgrootte	Benaming
50 - 150 μm	Uiterst fijn tot fijn
150 - 300 μm	Matig fijn tot matig grof
300 - 2000 μm	Grof tot uiterst grof

De ruimtes tussen de zandkorrels worden poriën genoemd. De verhouding tussen het poriënvolume en het volume aan zandkorrels wordt de porositeit (n) genoemd. In het algemeen wordt voor een watervoerend pakket in Nederland een porositeit van 0,35 aangehouden.

Uitgaande van verzadigde watervoerende pakketten zijn de poriën dus volledig gevuld met grondwater. Grondwater kan zeer makkelijk door watervoerende pakketten via de poriën stromen. De doorlatendheid van een watervoerend pakket is dan ook groot (circa 5 m/d bij pakket bestaande uit fijn zand en 50 m/d bij een pakket bestaande uit grof zand).

De doorlatendheid is afhankelijk van de korrelgrootte (M_{50} -cijfer) in de zandlaag. Hoe groter de korrelgrootte des te groter is de doorlatendheid. Ook hier wordt onderscheid gemaakt tussen horizontale en verticale stroming. De stroming in een watervoerend pakket vindt voornamelijk in horizontale richting plaats. De aanwezigheid van klei- of veenlenzen of een variatie in zandlaagjes bestaande uit grover of fijner zand kunnen de verticale stroming weinig tot veel vertragen, zodat in de regel de verticale doorlatendheid (k_v) van een watervoerend pakket lager is dan de horizontale doorlatendheid (k_h).

Er wordt dan ook gesproken van een anisotrope laag. Met deze benaming wordt aangegeven dat de doorlatendheid binnen een watervoerend pakket afhankelijk is van de richting. De verhouding tussen de horizontale en verticale doorlatendheid wordt de (verticale) anisotropiefactor genoemd.

Ter bepaling van de (verticale) anisotropiefactor dienen de gemiddelde horizontale en verticale doorlatendheid van een watervoerend pakket te worden berekend. Dit wordt als volgt uitgevoerd.

1 Gemiddelde horizontale doorlatendheid

De gemiddelde horizontale doorlatendheid van een watervoerend pakket kan worden berekend door voor elk zandlaagje, waaruit het watervoerende pakket is opgebouwd (zie bijvoorbeeld boorbeschrijving van een proefboring), het doorlaatvermogen (kD) te berekenen. Het doorlaatvermogen van een zandlaagje is een vermenigvuldiging van de horizontale doorlatendheid (k_h) en de dikte (D) van het zandlaagje. Door sommatie van de berekende doorlaatvermogens van de zandlaagjes wordt het doorlaatvermogen van het totale watervoerende pakket verkregen. Het totale doorlaatvermogen gedeeld door de totale dikte van het watervoerende pakket resulteert in de gemiddelde horizontale doorlatendheid.

2 Gemiddelde verticale doorlatendheid

De gemiddelde verticale doorlatendheid (k_v) kan worden berekend door voor elk zandlaagje, waaruit het watervoerende pakket is opgebouwd (zie bijvoorbeeld boorbeschrijving van een proefboring), de verticale weerstand (c) te berekenen. De verticale weerstand per zandlaagje is het quotiënt van de dikte van het zandlaagje en de verticale doorlatendheid ($c=D/k_v$). Hierbij wordt verondersteld dat binnen één laagje de horizontale doorlatendheid gelijk is aan de verticale doorlatendheid. Door sommatie van de berekende verticale weerstanden van de zandlaagjes wordt de verticale weerstand van het totale watervoerende pakket verkregen. De totale dikte van het watervoerende pakket gedeeld door de totale verticale weerstand resulteert in de gemiddelde verticale doorlatendheid.

3 Anisotropiefactor

De anisotropiefactor in een watervoerend pakket wordt bepaald door de gemiddelde horizontale doorlatendheid te delen door de gemiddelde verticale doorlatendheid. Bij een hoge anisotropiefactor is de gemiddelde verticale doorlatendheid laag vergeleken met de gemiddelde horizontale doorlatendheid van het watervoerende pakket. Een lage verticale doorlatendheid heeft als effect binnen een watervoerend pakket dat de verticale weerstand hoog is. Met deze methode wordt een ondergrens berekend van de anisotropie. Wanneer door een nauwkeuriger boormethode een gedetailleerder beeld ontstaat van de variatie in korrelgrootte over de diepte dan zal dit altijd leiden tot een hogere anisotropie en daarmee samenhangend een hogere weerstand.

De benaming van de verschillende watervoerende pakketten is identiek aan die van de scheidende lagen: eerste watervoerende pakket, tweede watervoerende pakket, derde watervoerende pakket et cetera (nummering loopt op met de diepte).

Er kunnen diverse watervoerende pakketten worden onderscheiden:

- 1 Freatisch watervoerend pakket: pakket begint direct aan maaiveld en wordt alleen aan de basis begrensd door een scheidende laag;
- 2 Semi-gespannen watervoerend pakket: pakket dat aan top en basis wordt begrensd door een scheidende laag;
- 3 Gespannen watervoerend pakket: pakket dat zowel aan top en basis wordt begrensd door een ondoorlatende laag. Dit pakket komt in Nederland tot een diepte van 250/300 m-NAP nagenoeg niet voor en wordt derhalve in dit document buiten beschouwing gelaten.

Voor het ontwerp van een energieopslag is het van belang om bij toepassing van energieopslag in een freatisch of semi-gespannen pakket rekening te houden met een aantal randvoorwaarden. Ten opzichte van een semi-gespannen pakket dient bij toepassing in een freatisch pakket extra aandacht te worden besteed aan de volgende twee randvoorwaarden:

- 1 Grondwaterkwaliteit voor wat betreft de aanwezigheid van een redoxgrens (dit is de grens tussen zuurstof- of nitraathoudend grondwater en ijzerhoudend grondwater);
- 2 Wateroverlast aan maaiveld tijdens infiltratie.

Voor het ontwerp van een energieopslag wordt verwezen naar paragrafen 2.2 en 2.3. In deze paragrafen worden de randvoorwaarden nader besproken.

Richtlijn bodemopbouw

Bepaal zo goed mogelijk de bodemopbouw op de onderzoekslocatie.

Hiervoor dienen ten minste de twee dichtstbijzijnde boringen bij het NITG-TNO en/of Regis te worden opgevraagd en bekeken.

2.1.3 Grondwater en grondwaterstroming

Zoals in de inleiding is aangegeven, is de bodem vanaf enkele centimeters cq. meters onder maaiveld volledig verzadigd met grondwater. Belangrijk is ook dat met name in de watervoerende pakketten het grondwater horizontaal stroomt. Deze stroming wordt veroorzaakt door van nature aanwezige drukverschillen van plek tot plek en wordt ook wel de regionale grondwaterstroming genoemd. Deze drukverschillen zijn het gevolg van natuurlijke factoren zoals neerslag of hoogteverschillen in maaiveld, maar ook door activiteiten door de mens zoals het onttrekken van grondwater ten behoeve van drinkwatervoorziening of het inpolderen van gebieden.

De stroomsnelheid en richting van het grondwater varieert in Nederland van gebied tot gebied en met de diepte. In tabel 2.2 is een aantal voorbeelden van regionale grondwaterstroming weergegeven inclusief de richting en de snelheid.

Tabel 2.2 Regionale grondwaterstroming

Gebied	W.v.p.	Diepte [m-mv]	Verhang [‰]	Richting	Doorlatendheid [m/d]	Stroomsnelheid [m/a]
Leeuwarden	2 ^e + 3 ^e	25	0,04	Zuidoostelijk	22	0,9
Arnhem	2 ^e	70	1,4	Zuid/zuidwestelijk	30 - 65	50 - 95
Arnhem	3 ^e	150	1,2	Zuid	20 - 40	25 - 50
Nijmegen*	1 ^e	30	0,35 - 0,45	Noordwestelijk	25 - 140	12 - 50
Nijmegen	2 ^e	ca. 60	0,2 - 0,5	Westelijk	50	10 - max. 25
Utrecht	1 ^e	ca. 30	0,3	West/zuidwestelijk	45	15
Amsterdam	3 ^e	ca. 90	0,2	West/zuidwestelijk	35	7,5
Den Haag	1 ^e	ca. 45	0,55	Zuidoostelijk	40	20
Den Bosch	1 ^e	ca. 60	0,3	Noordwestelijk	12	12

* Stroomsnelheid wordt mede bepaald door de waterstand van de rivier de Waal.

Uit de tabel blijkt dat de grondwaterstroomsnelheid bepaald wordt door het verhang in freatische grondwaterstand of stijghoogte van een watervoerende pakket, de doorlatendheid van het watervoerende pakket en de porositeit.

De relatie ziet er als volgt uit:

$$v = ((k * i)/n) * 365 d$$

- v: grondwaterstroomsnelheid (zg. poriesnelheid) [m/a]
k: doorlatendheid [m/d]
i: verhang [‰] - dit is de verhouding tussen het verschil in freatische grondwaterstand of stijghoogte van het watervoerende pakket in meters en een horizontale afstand van 1000 meter
n: porositeit [-]

In feite is de grondwaterstroomsnelheid gelijk aan de Darcy-snelheid gedeeld door de porositeit. In relatie tot energieopslag is de grondwaterstroomsnelheid van belang voor de thermische verliezen die naar de omgeving kunnen optreden. In tabel 2.3 is aangegeven wanneer gesproken kan worden van weinig of veel verliezen rekening houdend met een grote of kleine doorlatendheid en verhang. Opgemerkt wordt dat de getallen bij doorlatendheid en verhang slechts een indicatie zijn.

Tabel 2.3 Relatie doorlatendheid en verhang met verliezen van koude en/of warmte

Doorlatendheid w.v.p.	Verhang	Verliezen koude en/of warmte
Klein (5 m/d)	Klein (0,1 ‰)	(Zeer) weinig
Klein (5 m/d)	Groot (1,0 ‰)	Matig
Groot (40 m/d)	Klein (0,1 ‰)	Matig
Groot (40 m/d)	Groot (1,0 ‰)	(Zeer) veel

Gezien het feit dat vrijwel altijd grondwaterstroming aanwezig is (zie tabel 2.2), is er dus ook altijd sprake van verliezen van warmte en/of koude naar de omgeving. Deze verliezen kunnen beperkt worden door tijdens het ontwerp een goede bronconfiguratie te bepalen. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 2.2 en 2.3.

Ten aanzien van verticale stroming is het van belang om geen filters te plaatsen over een scheidende laag met een stijghoogteverschil, indien dit leidt tot aanzienlijke verliezen van de opgeslagen hoeveelheid water.

Zout grondwater

In een groot deel van Nederland (met name in de kustprovincies) moet rekening worden gehouden met het voorkomen van zoet, brak en zout grondwater. In bijvoorbeeld Amsterdam varieert het chloridegehalte van het grondwater binnen een watervoerende pakket met de diepte. Het chloridegehalte kan van 1.000 tot 10.000 mg/l met de diepte toenemen. Deze variatie in chloridegehalte leidt tot dichtheidsverschillen over de diepte. Hiermee dient bij de bepaling van de horizontale en verticale grondwaterstroming rekening te worden gehouden.

2.1.4 Grondwaterkwaliteit en grondwatertemperatuur

Grondwaterkwaliteit

Bij een ontwerp voor een energieopslagsysteem dient rekening te worden gehouden met de grondwaterkwaliteit. Een drietal aspecten is van belang:

- 1 redoxgrens (speelt met name bij een freatisch watervoerend pakket);
- 2 zoet/brakgrensvlak;
- 3 gasgehalte van het grondwater.

Ad.1 De redoxgrens is de grens tussen zuurstof- of nitraathoudend en ijzerhoudend grondwater. Wanneer zuurstofhoudend en ijzerhoudend grondwater met elkaar mengen, zal (onoplosbaar) ijzeroxide worden gevormd. Bij menging van nitraathoudend en ijzerhoudend grondwater treedt hetzelfde verschijnsel op. Bij energieopslag kan menging optreden in het geval het filter zowel in beide soorten grondwater is aangelegd of als deze redoxgrens door de onttrekking tot in het filter wordt aangetrokken. Vlokvorming van ijzeroxide treedt dan met het gevolg dat de bron verstopt.

Om dit te voorkomen dient het filter volledig in grondwater van één kwaliteit te worden aangebracht, op voldoende afstand van de redoxgrens. Mede gezien het feit dat bij freatische pakketten ook rekening dient te worden gehouden met eventueel wateroverlast aan maaiveld betekent dit in de praktijk dat het filter zo diep mogelijk in het watervoerende pakket wordt geplaatst. Indien een redoxgrens aanwezig is, dient berekend te worden of deze grens in de bron getrokken kan worden.

Voor wat betreft een opslag/recirculatiesysteem is dit risico nog zelfs groter dan bij opslag, omdat de bronnen bij een recirculatiesysteem slechts één functie hebben (alleen onttrekken of infiltreren). De onttrekking van grondwater uit de onttrekkingsbron heeft een grotere impact op een eventueel aanwezige redoxgrens dan bij een opslagsysteem waar een bron seizoensmatig omwisselt van onttrekkings- naar infiltratiebron. Bij een monobronstelsel is het risico even groot als bij een opslagsysteem.

- Ad. 2 Zowel in freatische als in semi-gespannen watervoerende pakketten kan een zoet/brak-grensvlak aanwezig zijn. Dit betekent dat de grondwaterkwaliteit in dit pakket qua chloridegehalte op een bepaalde diepte over gaat van zoet naar brak of zelfs zout grondwater. In tabel 2.4 zijn de chloridegehalten aangegeven waarbij het grondwater overgaat van zoet naar brak naar zout water.

Tabel 2.4 Grenzen zoet, brak en zout grondwater¹

Grondwaterkwaliteit	Chloridegehalte [mg/l]
Zoet	0 - 150
Brak	150 - 1.000
Zout	> 1.000

Met name in de westelijke en noordelijke provincies spelen deze grensvlakken een belangrijke rol bij de bepaling of energieopslag in een bepaald watervoerend pakket wordt toegestaan.

Sommige provincies stellen dat de aanwezige voorraad zoet grondwater niet mag worden verkleind door het optrekken van het zoet/brakgrensvlak. In dat geval zullen vergunningverleners berekeningen kunnen vragen om de exacte invloed te bepalen. In overleg met de provincie dient het een en ander op dit punt te worden overlegd.

- Ad 3. Kennis van het gasgehalte van het grondwater is van belang in verband met de te hanteren druk in het grondwatercircuit. De druk moet zodanig hoog zijn dat opgeloste gassen in het grondwater in oplossing blijven bij het transport van het grondwater door het grondwatercircuit. In het geval de druk in het grondwatercircuit te laag is, bestaat het gevaar dat ontgassing van het grondwater optreedt. Bij infiltratie van het ontgaste grondwater in een bron zal het bronfilter acuut verstopen.
- Om te bepalen hoe hoog de te hanteren druk in het grondwatercircuit moet zijn, dient het grondwater onder andere geanalyseerd te worden op stikstof en methaan. Met name methaan is een gas waarop geanalyseerd moet worden in gebieden waar veen in de bodem voorkomt. Zo is bekend dat in de omgeving van Rotterdam/Delft op een diepte van 30 tot 40 m-mv methaangehaltes voorkomen van ongeveer 50 mg/l. Bij deze hoge gasgehalten ontgast het grondwater al (bijna) in het watervoerende pakket. In die gevallen is het beter om energieopslag in een dieper watervoerend pakket toe te passen.

Richtlijn grondwaterkwaliteit

Bepaal de grondwaterkwaliteit ten aanzien van het zoet/brakgrens-vlak, de redoxgrens en het gasgehalte. Bepaal op basis van deze gegevens de risico's ten aanzien van verzilting en putverstopping.

Grondwatertemperatuur

De temperatuur van het grondwater tussen 0 tot 200 m-mv is in Nederland circa 10 tot 13°C (zie lit. 7). Een temperatuur van 10°C wordt met name in freatische pakketten in het oosten en zuiden van Nederland aangetroffen. In het algemeen kan worden gesteld dat de grondwatertemperatuur met de diepte toeneemt. De toename is circa 2 à 3°C per 100 m diepte. Uit onderzoek is gebleken dat met name in stedelijk gebied de grondwatertemperatuur hoger is dan in het buitenstedelijk gebied. Tot een diepte van ongeveer 50 m ligt de bodemtemperatuur relatief hoger. Dit wordt veroorzaakt door onder andere de hogere luchttemperatuur (deze ligt hoger dan in buitenstedelijk gebied), de lagere verdamping door het ontbreken van vegetatie, de aanwezigheid van kelders en leidingen in de ondergrond en de afvoer van neerslag via het riool. Tot ongeveer 20 m-mv diepte staat de grondwatertemperatuur onder invloed van de atmosfeer. Het is van belang om de grondwatertemperatuur zo goed mogelijk te weten. Hiervoor dient de natuurlijke grondwatertemperatuur bepaald te worden aan de hand van bodemtemperatuurmetingen in de directe omgeving van de onderzoekslocatie (bijvoorbeeld door middel van een proefboring). Indien andere betrouwbare meetgegevens beschikbaar zijn (bijvoorbeeld eerder uitgevoerde metingen in een (proef-)boring nabij de locatie), kunnen deze gebruikt worden. Het is van belang om een goede indicatie van de grondwatertemperatuur te krijgen, zodat bepaald kan worden in welke mate thermische verliezen in de bodem optreden en of de gevraagde hoeveelheid energie met behulp van de energieopslag kan worden geleverd (zie ook paragraaf 2.2 thermische aspecten).

Richtlijn grondwatertemperatuur

Bepaal de grondwatertemperatuur ter hoogte van het te gebruiken w.v.p. op basis van bestaande rapportages of na metingen in de bodem.

2.1.5 Overige grondwaterwinningen

Bij het ontwerp dient ook informatie beschikbaar te zijn over bestaande grondwaterwinningen binnen een gebied met een straal van 1 km rond de onderzoekslocatie. Alle provincies hebben een overzicht van alle grondwaterwinningen die in de provincies plaatsvinden inclusief de informatie betreffende de onttrekkingsdiepte, de capaciteit, de vergunde hoeveelheid en het doel van de onttrekking.

Een nieuwe grondwateronttrekking (bijvoorbeeld een energieopslag) dient altijd rekening te houden met bestaande grondwateronttrekkingen in de directe omgeving. Dit houdt in dat de nieuwe installatie de bestaande onttrekkingen niet negatief mag beïnvloeden.

Een andere winning is slechts één van de mogelijke andere belangen. Een overzicht van belangen is beschreven in paragraaf 2.4.

Voorbeeld

Stel dat in de omgeving van de onderzoekslocatie een bestaand energieopslagsysteem ten behoeve van de koelvoorziening van een gebouw in gebruik is, dan moet het ontwerp van de nieuwe energieopslag zodanig zijn dat geen verstoring van de koelvoorziening van de bestaande installatie optreedt.

Een verstoring zou mogelijk zijn wanneer de nieuwe installatie bovenstrooms van de bestaande wordt aangelegd, waarbij de warme bron van de nieuwe installatie bovenstrooms van de koude bron van de bestaande installatie komt te liggen. Een andere mogelijkheid tot verstoring kan zijn als de nieuwe koude bron bovenstrooms van de bestaande koude bron wordt aangelegd en waarbij de gemiddelde infiltratietemperatuur lager of hoger ligt dan bij het bestaande systeem. Bij een te kleine afstand tussen deze bronnen kan thermische kortsluiting ontstaan met het gevolg dat de koude bel van de bestaande installatie wordt opgewarmd of afgekoeld. Dit betekent een vermindering van het koelvermogen van de bestaande installatie.

Niet alleen op thermisch gebied kan negatieve beïnvloeding optreden, maar ook op hydrologisch gebied zoals extra veranderingen rond het bestaande systeem ten gevolge van de hydrologische effecten veroorzaakt door het nieuwe systeem. Hiervoor wordt tevens verwezen naar paragraaf 2.3.4.

Richtlijn grondwaterwinnings

Bepaal aan de hand van een provinciaal overzicht de bestaande grondwaterwinnings binnen een straal van 1 km rond de onderzoekslocatie en bepaal de mogelijke interacties.

2.1.6 Bodem- en grondwaterverontreinigingen

In de meeste steden in Nederland worden bodem- en grondwaterverontreinigingen aangetroffen. Meestal komen deze verontreinigingen in de eerste 5 m van de bodem voor. Verontreinigingen die vaak voorkomen, zijn samengevat in tabel 2.5.

Tabel 2.5 Meest voorkomende verontreinigingen

Verontreiniging	Verontreinigingsbron	Bodem of grondwater	Mobiel of immobiel
Minerale oliën	Huisbrandolietanks, tankstations, garages, sloperijen	Bodem	Immobiel
Gechloroerde koolwaterstoffen (tri, per)	Chemische wasserijen, textielindustrie, chemische industrie en kunststofindustrie	Grondwater	(Zeer) mobiel
Aromaten	Textiel en grafische industrie, gasfabrieken, chemische industrie, kunststofindustrie	Grondwater	Mobiel
PAK	Gasfabrieken	Bodem, grondwater	Matig mobiel
Zware metalen	Metaalbewerking, leerlooierijen, loodhoudende benzine	Bodem	Immobiel

Immobilie verontreinigingen kenmerken zich door het feit dat zij zich hechten aan het bodemmateriaal. Een kenmerk van de (zeer) mobiele verontreinigingen is dat zij zeer makkelijk met het grondwater mee stromen, waardoor het zeer moeilijk te bepalen is waar de verontreiniging zich precies bevindt. Bovendien kunnen zij op grotere diepte aangetroffen worden (bijvoorbeeld 40 m-mv).

Met name de gechloreerde koolwaterstoffen kunnen tot grote diepte en afstand worden aangetroffen, omdat ze zwaarder zijn dan water. Hierdoor stromen ze snel tot op de bodem van het aanwezige watervoerende pakket.

In relatie tot energieopslag is het van belang om informatie over bodem- en grondwaterverontreinigingen in te winnen, omdat ten gevolge van de grondwateronttrekkingen en -infiltratie bij energieopslag de stroming van het grondwater wordt beïnvloed en daarmee bodemverontreinigingen mogelijk worden verplaatst. Het gaat dan met name om de verontreinigingen binnen een straal van circa 250 tot 300 m rond de onderzoekslocatie. Hierbij wordt wel de kanttekening geplaatst dat deze straal meestal te klein is voor de bepaling van de invloed op zeer mobiele verontreinigingen in het grondwater in het opslagpakket. Derhalve dient in een groter gebied hierop gescreend te worden. Dit invloedsgebied dient bepaald te worden op basis van globale berekeningen aan het intrekgebied en aan de verandering in de grondwaterstroming. Ten gevolge van de grondwateronttrekkingen en -infiltraties door de energieopslag kunnen verontreinigingen zowel horizontaal als verticaal worden verplaatst. Door deze verplaatsing kunnen niet-verontreinigde gebieden ook verontreinigd worden. Een horizontale verplaatsing is mogelijk, doordat de verontreiniging tijdens een onttrekking richting het bronfilter wordt aangetrokken. Mogelijk wordt zelfs het verontreinigde grondwater onttrokken. Het onttrokken verontreinigde grondwater wordt op enige afstand weer in de bodem geïnfilteerd. Dit betekent dan ook een extra verplaatsing van de verontreiniging naar een ander gebied.

Een verticale verplaatsing ontstaat ten gevolge van een stijghoogteverschil over een scheidende laag. Meestal gaat het om een verschil tussen de freatische grondwaterstand en de stijghoogte van het 1^e watervoerende pakket. Dit verschil kan door de grondwateronttrekking groter zijn dan in de natuurlijke situatie zonder grondwateronttrekking. Hierdoor kan een ondiepe verontreiniging naar diepere lagen worden verplaatst.

Een verplaatsing van een bodemverontreiniging is over het algemeen een ongewenste situatie, waardoor de kans groot is dat voor de opslag(recirculatie) geen vergunning Grondwaterwet (Gww) wordt verleend. Hierbij wordt opgemerkt dat bij opslag/recirculatiesystemen bij aanwezigheid van bodemverontreinigingen verplaatsing van bodemverontreinigingen een grotere rol speelt dan bij opslagsystemen. Dit heeft te maken met het feit dat opslag/recirculatie bestaat uit een onttrekkings- en een infiltratiebron. De onttrekking van grondwater uit de onttrekkingsbron heeft een grotere impact op eventuele verontreinigingen dan bij een opslagsysteem waar een bron seizoensmatig omwisselt van onttrekkings- naar infiltratiebron.

Voor het verzamelen van de informatie gebruik worden gemaakt van internet met het adres <http://www.bodemloket.nl> en kan de betreffende gemeente worden ingeschakeld. De gemeente heeft een volledig overzicht van alle verontreinigingslocaties in de gemeente. De provincie is ook een informatiebron, maar de provincie is in principe alleen op de hoogte van de ernstige verontreinigingen waarvoor een saneringsplan is opgesteld of waarmee binnen afzienbare tijd wordt gestart met de sanering. Het overzicht van deze ernstige verontreinigingen is opgenomen in het Provinciaal Bodemsaneringsprogramma van de betreffende provincie.

Richtlijn bodemverontreinigingen

Bepaal aan de hand van informatie bij de gemeente en provincie de aanwezigheid van verontreinigingen in de bodem en het grondwater in een gebied met een straal van 300 m rond de onderzoekslocatie en van grondwaterverontreinigingen in het opslagpakket binnen 500 m.

2.1.7 Geohydrologisch onderzoek

Het is mogelijk dat tijdens het uitzoeken van de geohydrologie geconcludeerd moet worden dat niet voldoende inzicht is verkregen met behulp van de genoemde informatiebronnen. In deze situatie is het dan ook niet mogelijk om vast te stellen of energieopslag bodemtechnisch haalbaar is. Om bepaalde onduidelijkheden in bodemopbouw, grondwaterkwaliteit et cetera weg te nemen kan een aanvullend bodem- en grondwateronderzoek noodzakelijk zijn, het zogenaamde geohydrologisch onderzoek. In tabel 2.6 is een overzicht gegeven van aanvullende geohydrologische onderzoeken die vaak worden toegepast.

Tabel 2.6 Overzicht aanvullende geohydrologische onderzoeken

Aanvullend onderzoek	Bodem of grondwater	Doel	Methode
Proefboring	Bodem	Bepaling bodemopbouw	Puls- of zuigboring
Zeefkrommes	Bodem	Bepaling korrelgroottes van het te gebruiken w.v.p.	Grondmonsters van de fijnste lagen
Boorgatmeting	Bodem en grondwater	Bodemopbouw: ligging kleilagen bepaling ligging zoet/zoutgrensvlak	Kleilagen: gammameting en weerstandsmeting zoet/zoutgrensvlak: weerstandsmeting
Putproef	Bodem	Bepaling doorlatendheid / doorlaatvermogen van het w.v.p.	Onttrekking grondwater uit put met filter in het beoogde w.v.p. met een bepaald debiet gedurende een bepaalde tijd. Aan de hand van de gemeten verlaging van de stijghoogte, het debiet en de tijd kan de doorlatendheid worden bepaald.
Sonderingen	Bodem	Bepaling ondiepe bodemopbouw (max. circa 30 m-mv)	Wegdrukken van een sonde in de bodem. Aan de hand van de conusweerstand, de kleef en het wrijvingsgetal kunnen klei- zand- en veenlagen worden onderscheiden.
Bodemtemperatuurmeting	Grondwater	Bepaling grondwatertemperatuur op verschillende dieptes.	Temperatuurmeting wordt in het veld uitgevoerd in het diepste peilfilter, vanaf maaiveld bijvoorbeeld elke 5 m.
Grondwateranalyse	Grondwater	Bepaling grondwaterkwaliteit op ionenbalans, chloridegehalte, gasgehalte, redoxgrens en eventuele grondwaterverontreinigingen	Monsternamen grondwater uit verschillende peilfilters in de proefboring of bestaande peilfilters. Deze grondwatermonsters worden in een gecertificeerd laboratorium geanalyseerd op de gewenste parameters.

Aanvullend onderzoek	Bodem of grondwater	Doel	Methode
Minifilters	Bodem en grondwater	Bepaling grondwaterkwaliteit tot max. 30 m-mv: grondwaterverontreinigingen, redoxgrens, chloridegehalte	Kleine filters worden in de grond weggedrukt met behulp van een sondeerwagen. Verkregen grondwatermonsters worden in een gecertificeerd laboratorium geanalyseerd op de gewenste parameters.

Bij deze tabel worden nog enkele opmerkingen geplaatst:

- 1 Een proefboring is in eerste instantie een methode om de bodemopbouw op de onderzoekslocatie te bepalen. Na het boren kan in het boorgat een boorgatmeting worden uitgevoerd als de boring volgens de zuigboormethode is uitgevoerd. Bij de pulsboormethode is geen boorgatmeting mogelijk;
- 2 Na het boren van de proefboring dient het boorgat conform de aangetroffen bodemopbouw te worden aangevuld;
- 3 Een proefboring kan tevens gebruikt worden voor analyse van de grondwaterkwaliteit. Hiervoor dienen op verschillende dieptes filters van circa 1 m lengte te worden geplaatst. De keuze van het aantal te plaatsen filters en de filterdieptes hangt af van de gewenste informatie over de grondwaterkwaliteit;
- 4 Om betrouwbare informatie over de grondwaterkwaliteit te verkrijgen, dienen de grondwatermonsters op zijn vroegst vier weken na de aanleg van de proefboring te worden genomen. Het grondwater in de proefboring is direct na de proefboring een mengwater van grondwater van verschillende dieptes en van het gebruikte werkwater. Na vier weken is dit water veelal voldoende afgestroomd. Rond peilfilters in slecht doorlatende lagen of als de regionale stroming gering is, kan vier weken zelfs nog onvoldoende zijn;
- 5 Hoge methaangehaltes worden vooral aangetroffen in het 1^e watervoerende pakket onder een deklaag die veen bevat (westen en noorden van Nederland). Hoge stikstofgehaltes worden vooral aangetroffen in het oosten en zuiden van Nederland waar de intensieve veehouderij voor een hoge nitraatbelasting zorgt;
- 6 Om de diepte van een redoxgrens of het zoet/brakgrensvlak goed te kunnen bepalen, is het van belang om onder en boven de verwachte diepte meerdere filters te plaatsen.

Richtlijn geohydrologisch onderzoek

Bij onvoldoende inzicht in de bodemtechnische haalbaarheid van een energieopslag dient extra bodem- en/of grondwateronderzoek op de onderzoekslocatie te worden uitgevoerd met behulp van een proefboring, sonderingen of minifilters.

2.2 Thermische aspecten

2.2.1 Bodemeigenschappen in relatie tot warmtetransport in de bodem en ontwerp-aspecten

Bij energieopslag wordt koude en/of warmte in het grondwater opgeslagen. Dit houdt in dat in de regel rond de koude cq. warme bron van het systeem grondwater aanwezig is met een lagere resp. hogere temperatuur dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Bij opslag van koude en/of warmte in het grondwater is er tevens sprake van warmtetransport in de bodem.

Dit transport wordt bepaald door een aantal factoren:

- 1 grondwaterstroming;
- 2 warmtecapaciteit;
- 3 warmtegeleiding;
- 4 dispersie.

1 Grondwaterstroming

Zoals uit paragraaf 2.1.3 is gebleken, is overal in Nederland grondwaterstroming aanwezig. De snelheid van het grondwater is afhankelijk van het verhang en de doorlatendheid van het watervoerende pakket (zie tabel 2.3). De mate waarin de opgeslagen koude en/of warmte kan afstromen naar de omgeving is afhankelijk van de grootte van de grondwaterstroomsnelheid. In figuur 2.2 wordt de mate van afstroming geïllustreerd. In het rechter plaatje is het effect weergegeven van een hoge grondwaterstroomsnelheid. De koude en warme bel zijn niet mooi concentrisch rond de bronnen aanwezig, maar waaieren uit in de richting van de grondwaterstroming met het gevolg dat de koude/warmte na bijvoorbeeld 20 jaar tot op een paar honderd meter van de bronnen wordt aangetroffen. In het linker plaatje is de grondwaterstroomsnelheid klein waardoor de koude en warme bel min of meer concentrisch rond de bronnen liggen. Er is vrijwel geen afstroming naar de omgeving.

De grootte en de richting van de grondwaterstroming is van belang voor het ontwerp van een energieopslagsysteem, met name voor het kiezen van de juiste locatie van de bronnen. De grondwaterstroming kan zodanig groot zijn dat de gewenste hoeveelheid koude en/of warmte voor een deel naar de omgeving is afgestroomd met het gevolg dat dit niet meer voor koeling en/of verwarming beschikbaar is. Dit kan worden voorkomen door bij energieopslag een juiste positie van de bronnen te kiezen. In de regel wordt aangehouden dat de bron die de gewenste energievorm moet leveren bovenstrooms van de andere bron wordt geplaatst. In tabel 2.7 is aangegeven hoe de bronnen bij diverse opslagsystemen dienen te worden gepositioneerd rekening houdend met de te leveren energie.

Tabel 2.7 Positionering van de bronnen bij opslag(/recirculatie)systemen

Opslagsysteem	Gewenste energie	Positie bronnen
Koudeopslag	Koude	Koude bron bovenstrooms, warme bron benedenstrooms
Warmteopslag	Warmte	Warme bron bovenstrooms, koude bron benedenstrooms
Energieopslag	Koude en warmte	De koude en de warme bron zijn ten opzichte van de grondwaterstromingsrichting naast elkaar geprojecteerd (de denkbeeldige lijn tussen de koude en warme bron staat loodrecht op de stromingsrichting)
Opslag/recirculatie	De natuurlijke grondwatertemperatuur is gewenst	Onttrekkingsbron bovenstrooms

* Opgemerkt dient te worden dat sommige provincies eisen dat de onttrekkingsbron benedenstrooms van de infiltratiebron wordt geplaatst.

Richtlijn bronlocatie

De bron die verantwoordelijk is voor levering van de belangrijkste vorm van energie (warmte of koude) wordt bij voorkeur bovenstrooms van de andere bron geplaatst. Bij energieopslag waarbij beide energievormen even belangrijk zijn worden de bronnen min of meer dwars op de stromingsrichting geplaatst. Bij opslag/recirculatie verdient het de voorkeur de onttrekkingsbron bovenstrooms van de infiltratiebron te plaatsen (mits de provincie dit toelaat).

In het algemeen wordt gesteld dat voor energieopslag een bronafstand van 3 keer de thermische straal dient te worden aangehouden. Hierbij wordt uitgegaan van het feit dat het systeem thermisch in balans is en dat thermische kortsluiting dient te worden voorkomen.

De thermische straal wordt als volgt gedefinieerd:

$$r_{th} = \sqrt{((c_w * Q) / (c_a * H * \pi))}$$

r_{th} : thermische straal van de opgeslagen koude of warmte [m]

c_w : warmtecapaciteit van water [J/(m³K)]

c_a : warmtecapaciteit van de aquifer [J/(m³K)] (=n c_w + (1-n) c_r ; zie onderdeel 'warmtecapaciteit')

Q: de onttrokken of geïnjecteerde hoeveelheid water per seizoen [m³]

H: filterlengte [m]

De thermische straal kan gezien worden als de afstand in het watervoerende pakket tot waar de temperatuur beïnvloed wordt, gezien vanaf de infiltratiebron, als er geen verliezen naar de omgeving zijn.

Er zijn situaties denkbaar dat van bovengenoemde vuistregel moet worden afgeweken.

Hieronder volgt een opsomming van deze afwijkende situaties:

- 1 In de situatie dat de gemiddelde infiltratietemperaturen van de koude en warme bron beide onder of beide boven de natuurlijke grondwatertemperatuur liggen, is thermische kortsluiting gewenst. In dat geval kan worden volstaan met een benodigde bronafstand van ongeveer 1 à 2 keer de thermische straal.
- 2 Wanneer alleen koude of warmte gewenst is (bij koudeopslag respectievelijk warmteopslag) is een bronafstand kleiner dan 3 keer thermische straal mogelijk, mits de bron die de gewenste energievorm moet leveren bovenstrooms van de andere bron wordt geplaatst.
- 3 In het geval dat de beschikbare ruimte voor de bronnen onvoldoende is (bijvoorbeeld in centra van grote steden), zal de afstand tussen de bronnen noodgedwongen kleiner zijn dan 3 keer de thermische straal waardoor thermische kortsluiting zeker zal optreden. De gewenste hoeveelheid energie (koude of warmte) kan dan toch worden geleverd door in het voorafgaande seizoen meer koude of warmte op te slaan dan bij voldoende bronafstand nodig is. Indien bovendien de grondwaterstroming groot is dan is het zeer belangrijk om de bron die de gewenste energievorm moet leveren bovenstrooms van de andere bron te plaatsen. De grondwaterstroming zorgt voor een reductie van de thermische kortsluiting in de bovenstrooms gelegen bron terwijl in de benedenstrooms gelegen bron de mate van thermische kortsluiting wordt vergroot.

Bij opslag/recirculatie dient zodanig te worden ontworpen dat zoveel mogelijk spreiding in verblijftijden in de aquifer wordt verkregen. Dit is belangrijk voor het krijgen van een constante onttrekkingstemperatuur. Over het algemeen blijkt plaatsing van de onttrekkingsbron bovenstrooms van de infiltratiebron het beste resultaat op te leveren.

Richtlijn benodigde bronafstand

De bronafstand is bij voorkeur groter dan of gelijk aan 3 keer de thermische straal indien het opslagsysteem thermisch in balans is en thermische kortsluiting moet worden voorkomen.

Indien de temperaturen van beide bronnen boven of beide onder de natuurlijke grondwatertemperatuur liggen, is het wenselijk om thermische kortsluiting te creëren. De optimale bronafstand is dan 1 à 2 keer de thermische straal.

Bij beperkte beschikbare ruimte, waarbij 3 keer thermische straal als bronafstand niet haalbaar is, dient met een warmtetransportberekening uit te wijzen wat energetisch mogelijk is.

Als er geen sprake is van een thermische balans, dient door middel van berekeningen met een thermisch model als HstWin 2D/3D het gedrag van de warmte en koude berekend te worden.

2 Warmtecapaciteit

De warmtecapaciteit is een maat voor de warmte die een medium kan opnemen. De bodem bestaat uit twee verschillende media: water en korrelskelet (zand of klei et cetera). Elk medium heeft een eigen warmtecapaciteit. Op basis van de warmtecapaciteiten per medium kan met behulp van de volgende formule de warmtecapaciteit van het totale watervoerende pakket (aquifer) worden bepaald.

$$c_a = n c_w + (1-n) c_r$$

- c_a : warmtecapaciteit aquifer [J/(m³K)]
 c_w : warmtecapaciteit water [J/(m³K)]
 c_r : warmtecapaciteit korrelskelet [J/(m³K)]
 n : porositeit [-]

Voor een watervoerend pakket bestaande uit zand wordt in Nederland voor de porositeit over het algemeen een waarde van 0,35 aangehouden. In tabel 2.8 zijn voor een aantal verschillende media de warmtecapaciteiten weergegeven. Bij deze tabel wordt opgemerkt dat de opgegeven warmtecapaciteiten gelden bij een temperatuur van 20°C, met uitzondering van water. De opgegeven warmtecapaciteit voor water geldt bij een temperatuur van 10°C.

Tabel 2.8 Warmtecapaciteit van het bodemmateriaal

Bodemmateriaal	c_r [MJ/(m ³ K)]
Zand	2,2 - 2,9
Kleilig zand (80% zand en 20% klei)*	2,1 - 3,0
Zandige klei (80% klei en 20% zand)*	1,7 - 3,3
Klei	1,6 - 3,4
Klei met veenlagen (80% klei en 20% veen)*	1,4 - 3,5
Veen	0,5 - 3,8
Water	4,19

* De verdeling van klei en zand of klei en veen zijn aannames.

Op basis van de warmtecapaciteiten kan de verhouding worden bepaald tussen de snelheid van het thermisch front (V_{th}) en de snelheid van het water in de aquifer (V_w). De verhouding wordt als volgt weergegeven:

$$(V_{th} / V_w) = (n c_w / (n c_w + (1-n) * c_r))$$

Bij een porositeit van 0,35, een warmtecapaciteit van water van 4,19 MJ/(m³K) en een warmtecapaciteit van zand van ongeveer 2,5 MJ/m³K is de verhouding circa 0,5. Dit betekent dat het warmtetransport in de aquifer een factor 2 langzamer is dan het watertransport.

De warmtecapaciteit is één van de factoren die bepalend is voor de grootte van de thermische straal. De thermische straal en het belang daarvan voor het ontwerp is bij de factor 'grondwaterstroming' aan de orde gekomen.

3 Warmtegeleiding

Warmtetransport door warmtegeleiding vindt plaats in het watervoerende pakket waarin energieopslag wordt toegepast en via de onder- en bovenliggende scheidende lagen grenzend aan het watervoerende pakket.

Warmtegeleiding vindt voornamelijk plaats via het korrelskelet en minder via het grondwater. Dit blijkt uit het feit dat de warmtegeleidingscoëfficiënt van water kleiner is dan van bijvoorbeeld zandkorrels. In tabel 2.9 is voor een aantal bodemmateriaal de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) weergegeven.

Tabel 2.9 Warmtegeleidingscoëfficiënt van het bodemmateriaal

Bodemmateriaal	Warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) [W/(mK)]
Zand	2,4
Kleilig zand (80% zand en 20% klei)*	2,3
Zandige klei (80% klei en 20% zand)*	1,8
Klei	1,7
Klei met veenlagen (80% klei en 20% veen)*	1,4
Veen	0,4
Water	0,6

* De verdeling van klei en zand of klei en veen zijn aannames.

Afgekoeld of opgewarmd grondwater is bij energieopslag voor een bepaalde tijd in de bodem is opgeslagen (circa 1 tot 12 maanden), voordat de koude of warmte zal worden benut. In deze periode heeft het korrelskelet van de bodem tijd om koude/warmte naar de omgeving te geleiden. In de opslagaquifer zelf wordt geleiding sterk overheerst door dispersie (zie hieronder). Geleiding naar boven- en onderliggende lagen is wel belangrijk.

4 Dispersie

Naast grondwaterstroming en warmtegeleiding, die verantwoordelijk zijn voor warmtetransport in de bodem, bestaat er nog een derde factor: dispersie. Door de aanwezigheid van inhomogeniteiten in het watervoerende pakket, zoals klei- of veenlagen of zandlagen bestaande uit bijvoorbeeld fijner materiaal, wordt de stroming van het grondwater en daarmee ook het warmtetransport beïnvloed.

Dispersie is bij energieopslag met name verantwoordelijk voor de versmering van het warmtefront.

De dispersiecoëfficiënt voor warmtetransport (D_{th}) wordt als volgt gedefinieerd (weergegeven voor één dimensionale stroming).

$$D_{th} = (\alpha_L * C_w * q + \lambda) / C_a$$

D_{th} : dispersiecoëfficiënt [m²/s]

α_L : dispersiviteit [m]

q: grondwaterstroomsnelheid (darcy) [m/s]

Voor realistische waarden van (5m) , q (10 à 100 m/jaar) en λ ($2\text{W}/(\text{mK})$) is de eerste term veel groter dan de tweede term zeker op korte afstand van de bronnen.

Richtlijn

Om inzicht te verkrijgen in de warmteverliezen naar de omgeving en daarmee samenhangend het thermisch rendement dient voor het ontwerp en voor de effecten op de omgeving te worden gehouden met warmtegeleiding en dispersie. Deze kunnen met behulp van een warmtetransportmodel zoals HstWin 2D/3D berekend worden.

2.2.2 Ontwerp in relatie tot thermische aspecten

Om tijdens het ontwerp rekening te houden met de thermische aspecten dient het een en ander doorgerekend te worden met een warmtetransportmodel, waarin de genoemde aspecten verwerkt zijn. Hiervoor kan bijvoorbeeld het model HstWin 2D/3D worden toegepast. Met dit model kan warmte- en stoftransport worden berekend in een verzadigd 2 of 3-dimensionaal grondwaterstromingssysteem. HstWin 2D/3D simuleert de grondwaterstroming en het warmtetransport in één of meerdere lagen.

Beschrijving HstWin 3D

HstWin 3D simuleert warmte- en stoftransport in een verzadigd 3-dimensionaal grondwaterstromingssysteem. De vergelijkingen die numeriek kunnen worden opgelost, zijn:

1. de stromingsvergelijking van het grondwater in een verzadigd medium;
2. de warmtetransportvergelijking;
3. de stoftransportvergelijking.

Tevens wordt de warmtegeleiding naar boven- en onderliggende lagen gesimuleerd.

Deze drie vergelijkingen zijn gekoppeld door:

- de invloed van de effectieve stroomsnelheid op het convectief transport;
- de invloed van de temperatuur en de stofconcentratie op de vloeistofviscositeit;
- de invloed van druk, temperatuur en stofconcentratie op de vloeistofdichtheid.

Thermisch rendement

Tijdens het ontwerp van een energieopslagsysteem is het van belang om met de genoemde thermische aspecten rekening te houden. Uit paragraaf 2.2.1 is gebleken dat de grondwaterstroming, de warmtecapaciteit van de bodem, warmtegeleiding, dispersie en eventuele kortsluitingsstromen bepalend zijn voor het warmtetransport in de bodem en voor verliezen van opgeslagen koude of warmte.

Door rekening te houden met deze thermische aspecten kan worden bepaald hoeveel koude en/of warmte in de bodem dient te worden opgeslagen om zo aan de koude- en/of warmtevraag te voldoen, rekeninghoudend met de temperatuurniveaus die opgelegd zijn door het bovengrondse systeem. Indien de verliezen groot zijn, zal meer koude of warmte moet worden opgeslagen dan de koude- of warmtevraag.

Thermisch rendement/energieverliezen

Het thermisch rendement is gedefinieerd als het quotiënt van de aan het grondwater toegevoegde hoeveelheid energie en de teruggewonnen hoeveelheid energie.

Er kan gesproken worden van *warmteopslagrendement* en van *koudeopslagrendement*. Het warmteopslagrendement is het percentage van de aan het grondwater toegevoegde warmte dat er in de winter weer aan wordt onttrokken. Het koudeopslagrendement is het percentage van de in de winter aan het grondwater toegevoegde koude dat er in de zomer weer aan wordt onttrokken. Het koudeopslagrendement is complementair aan het warmteopslagrendement. Dat wil zeggen dat een koudeopslagrendement van 90% gelijk is aan een warmteopslagrendement van 111% (1 gedeeld door 0,9). Een koudeopslagrendement groter dan 100% betekent dus eigenlijk dat er netto meer koude aan de bodem wordt onttrokken dan er aan wordt toegevoegd.

Een rendement van 100% ('energiehoeveelheden in balans') wekt de suggestie dat er geen energieverliezen optreden. Dit is echter niet zo. Er wordt alleen evenveel koude aan het grondwater onttrokken als er aan wordt toegevoegd. Energieverliezen treden *altijd* op. De grootte van de energieverliezen worden vooral bepaald door de grootte van de grondwaterstroming, de geometrie van de opgeslagen warme en koude bellen en de afwijking van de koude en warme bellen ten opzichte van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Het thermisch rendement is dus geen maat voor de hoeveelheid energie die verloren gaat. Zelfs wanneer alle geïnjecteerde warmte en koude zou wegstromen kan het warmte- en koudeopslagrendement 100% zijn als er evenveel koude wordt onttrokken als is toegevoegd (bijvoorbeeld door meer water te verpompen).

Theoretisch zou het mogelijk zijn om altijd een rendement van 100% na te streven. Echter, doordat er energie afstroomt, zal de onttrekkingstemperatuur van de koude bronnen en warme bronnen na verloop van tijd stijgen of dalen in de richting van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Voor de gebruiker is grondwater met een temperatuur boven of onder een bepaalde temperatuur niet optimaal bruikbaar voor respectievelijk koeling of verwarming. Hierdoor moet soms extra koude of warmte geladen worden.

Energiebalans

In theorie zijn de warmte- en koudeverliezen in de bodem (energiebalans ten opzichte van de bodem) alleen dan bij benadering aan elkaar gelijk wanneer: (1) de koude brontemperatuur evenveel afwijkt van de natuurlijke grondwatertemperatuur als de warme brontemperatuur (bijvoorbeeld koud: 6°C, natuurlijk 12°C, warm 18°C) en bovendien, (2) de geometrie van de koude en de warme bel aan elkaar gelijk is en (3) de bronnen precies haaks op de grondwaterstroming staan. In de praktijk kan zelden aan de bovenstaande drie voorwaarden worden voldaan.

Het opslagrendement, of de energiebalans vanuit het oogpunt van het systeem, hangt slechts ten dele samen met de grootte van de energieverliezen in de bodem. Door het opleggen van een energiebalans van 100 % voor het systeem wordt niet per definitie een minimaal energieverlies in de bodem bereikt.

Voorts zal, afhankelijk van de randvoorwaarden van de warmte- en koudevragers, de klimatologische omstandigheden en de mogelijke positionering van de bronnen, er per jaar meer koude of meer warmte uit de opslag kunnen worden gehaald.

Temperatuurniveau

Naast inzicht in het thermisch rendement is ook inzicht nodig in het temperatuurverloop van de bronnen. Hierbij is het van belang om te bepalen of de onttrekkingstemperatuur uit de koude of warme bron (afhankelijk van de koude- of warmtevraag) voldoen aan de wensen van de gebruiker.

Als vuistregel kan worden gesteld dat altijd aan de koude- of warmtevraag kan worden voldaan als de ontwerponttrekkingstemperatuur (grondwaterzijdig) gelijk is aan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Het thermisch rendement is in dit geval van minder praktische betekenis.

Een aantal vuistregels voor temperaturen bij energieopslag:

- de onttrekkingstemperaturen liggen tussen de gemiddelde infiltratietemperatuur en de natuurlijke temperatuur (mits er geen thermische kortsluiting bestaat tussen de koude en warme bron);
- het ontwerp van de installatie dient ruimte te laten voor deze temperatuurverandering. De ontwerp onttrekkingstemperatuur dient enige graden hoger (koude bron) of lager (warme bron) te zijn dan de gemiddelde infiltratietemperatuur;
- hoe dichter de toegelaten onttrekkingstemperatuur bij de natuurlijke temperatuur ligt, hoe hoger het thermisch rendement zal zijn, en hoe minder risico er is dat de ontwerprichting niet gehaald wordt;
- het verloop van de onttrekkingstemperatuur dient zorgvuldig berekend te worden met behulp van daarvoor geschikte computermodellen zoals HstWin 2D/3D.

Bepaling filter lengte

De filterlengte bepaalt de hoogte van de koude of warme bel. De vorm van de bel is afhankelijk van de filterlengte en de opslaghoeveelheid. Hiermee wordt de thermische straal van de opslag bepaald. Belangrijk is dat een zodanige vorm van de koude of warme bel wordt verkregen, dat verliezen naar de omgeving door de grondwaterstroming en/of warmtegeleiding en dispersie tot een minimum worden beperkt.

Stel dat een heel lang filter wordt toegepast in vergelijking met de thermische straal, dan wordt een smalle, hoge koude of warme bel gevormd, waardoor t.g.v. de grondwaterstroming de kern van de koude of warme bel makkelijk naar de omgeving kan afstromen. Omgekeerd, in het geval dat een zeer kort filter wordt gebruikt, zullen de thermische verliezen groot zijn als gevolg van warmtegeleiding via de boven- of onderliggende scheidende laag. Omdat dispersie en grondwaterstroming belangrijker zijn dan verticale geleidingsverliezen is in het algemeen een iets platte vorm van de opslag voordeliger dan een hoge smalle vorm.

Filterstelling bij een monobron

Om bij een monobronstelsel kortsluiting te voorkomen, is het van belang om het warme filter boven het koude filter te plaatsen: warm water heeft een lagere dichtheid dan koud water.

Een monobronstelsel is tevens gebaat bij een hoge verticale anisotropie in het watervoerende pakket (bijvoorbeeld door aanwezigheid van een kleilens).

Thermische kortsluiting wordt gereduceerd door de filters boven en onder een kleilens te stellen.

Bronconfiguratie

Onder het ontwerp valt ook een goede keuze van de bronlocaties. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 2.2.1 onderdeel grondwaterstroming.

Richtlijn ontwerp op basis van thermische aspecten

Bij het ontwerp van een energieopslag dient het verloop van de onttrekkingstemperatuur uit de bronnen berekend te worden met behulp van een computermodel (zoals HstWin 2D/3D), tenzij ontworpen wordt op de natuurlijke onttrekkingstemperatuur en er geen risico is van kortsluiting. De berekende onttrekkingstemperaturen dienen te passen binnen het ontwerp van de koel-/verwarmingsinstallatie.

2.3 Hydrologische aspecten

2.3.1 Ontwerp in relatie tot hydrologische aspecten

Naast de thermische aspecten spelen bij het ontwerp van een energieopslagsysteem ook hydrologische aspecten een rol. Hierbij kan gedacht worden aan de volgende aspecten:

1. doorlatendheid en dikte van het watervoerende pakket;
2. het debiet waarmee grondwater zal worden onttrokken/geïnfilteerd;
3. de onttrekkings-infiltratienorm;
4. de diameter van de bronnen en filterlengte;
5. de injectiedruk;
6. water aan maaiveld.

1 Doorlatendheid en dikte van het watervoerende pakket

Uit het onderzoek naar de bodemopbouw blijkt welk watervoerend pakket geschikt is, wat de beschikbare dikte en de doorlatendheid is. Dit is van belang voor de bepaling van het maximale debiet dat door het pakket kan worden geleverd, de bepaling van de filterlengte en de diameter van de bronnen (zie ook punten 2, 3 en 4).

2 Debiet q_v

Het maximale debiet waarmee grondwater zal worden onttrokken en geïnfilteerd hangt af van het maximaal te leveren koelvermogen (P_i). In hoofdstuk 1 is aangegeven hoe deze relatie is.

Het maximale debiet vermenigvuldigt met het aantal vollasturen levert de maximaal te verplaatsen waterhoeveelheid in een seizoen.

3 De onttrekkings-infiltratienorm: hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 3 'Civiele Techniek'

4 De diameter van de bronnen en filterlengte

Op basis van de onttrekkings- en infiltratienorm wordt de diameter van de bronnen en de filterlengte bepaald. Bij de bepaling van de filterlengte dient rekening te worden gehouden met de volgende punten:

- a. de beschikbare dikte van het watervoerende pakket;
- b. de vorm van de warme of koude bel rond de bronnen.

- Ad a. Bij dunne pakketten (dikte bijvoorbeeld 20 tot 30 m) zal in de praktijk vaak de volledige dikte van het watervoerende pakket worden benut. De filterlengte is dan maximaal gelijk aan de dikte. Bij dikke pakketten (dikte bijvoorbeeld 50 tot 100 m) hoeft niet altijd het pakket volledig benut te worden. Dit is mede afhankelijk van de minimaal benodigde filterlengte om een bepaald debiet te kunnen onttrekken. Als bij kleine systemen met een maximaal debiet van bijvoorbeeld 30 m³/h slechts een filterlengte nodig is van bijvoorbeeld 15 m, dan zal niet de volledige dikte benut hoeven te worden. In dat geval dient ook de filterlengte afgestemd te worden met punt b.
- Ad b. De vorm van de warme of koude bel (juiste verhouding lengte filter en thermische straal) hangt af van de thermische aspecten. Hiervoor wordt dan ook verwezen naar paragraaf 2.2.

De effectieve filterlengte is de werkelijk benodigde filterlengte. In de praktijk kan het voorkomen dat het opslagpakket uit een afwisseling van zandlagen en kleilagen bestaat. Dit betekent voor de filterstelling dat ter hoogte van de kleilagen blindstukken worden toegepast. Alle lengtes van de filterstukken bij elkaar opgeteld is dan de effectieve filterlengte.

5 Injectiedruk

Tijdens het infiltreren van water in de bodem zal de stijghoogte in het opslagpakket in en direct rond de bron worden verhoogd. De mate van verhoging is afhankelijk van het debiet waarmee geïnjecteerd wordt en van het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket. Bij een groot doorlaatvermogen zal de verhoging minder groot zijn dan bij een klein doorlaatvermogen (uitgaande van hetzelfde debiet).

Uitgaande van volkomen bronfilters (filters worden geplaatst over de gehele hoogte van het watervoerende pakket) kan de stijghoogteverandering voor een doublet aan de hand van de volgende formule worden berekend:

$$\Delta h = (24q_v / 2\pi kH) * \ln (L / r_b)$$

- Δh : stijghoogteverandering [m]
 q_v : debiet [m³/h]
 k : doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/d]
 H : filterlengte [m]
 L : bronafstand [m]
 r_b : straal boorgat [m]

Tijdens het ontwerp dient rekening te worden gehouden met de stijghoogteverhoging. Bij te grote verhoging kan de zg. opbarstdruk worden overschreden, waardoor splijting van de bodem rond de bronnen kan optreden (zie ook hoofdstuk 3 'Civiele Techniek'). Bij een goed ontwerp wordt overschrijding van de opbarstdruk voorkomen.

Indien de bronnen het watervoerende pakket niet volledig doorsnijden is sprake van onvolkomen bronnen. Dit kan het geval zijn wanneer slechts een beperkte filterlengte nodig is en de bronfilters in een dik watervoerende pakket worden geplaatst. De filters worden boven-, midden of onderin het pakket aangebracht (een en ander kan bijvoorbeeld afhangen van de diepte van de grovere zandlagen in het pakket). In deze

situatie dient rekening te worden gehouden met het zg. partiële effect dat zorgt voor een extra verlaging of verhoging van de stijghoogte. De stijghoogteverandering kan dan niet met bovenstaande formule nauwkeurig worden bepaald. De stijghoogteverandering dient te worden bepaald met behulp van grondwaterstromingsmodellen (zie paragraaf 2.3.2).

6 Water aan maaiveld

Tijdens het injecteren van grondwater in een bron treden stijghoogteverhogingen op. In het geval van freatische pakketten kan bij te grote verhogingen wateroverlast aan maaiveld optreden. Dit dient door een goed ontwerp te worden voorkomen. Door het filter dieper in het pakket te plaatsen kunnen de verhogingen eventueel worden verkleind. Bij semi-gespannen pakketten zal water aan maaiveld minder snel optreden, omdat een scheidende laag aan top van het watervoerende pakket de waterstandsveranderingen in bovenliggende watervoerende pakket(-ten) zal dempen. Ook hier is het belangrijk om met behulp van grondwaterstromingsmodellen de stijghoogteverhogingen te bepalen.

2.3.2 Modelberekeningen

Voor het berekenen van de stijghoogteveranderingen kan gebruik worden gemaakt van grondwaterstromingsmodellen. Voorbeelden hiervan zijn MicroFEM, MLPU en Modflow. Een toelichting op MicroFEM en MLPU wordt hier gepresenteerd.

MicroFEM

Om de hydrologische effecten van een energieopslagsysteem te berekenen, kan gebruik worden gemaakt van het hydrologische softwarepakket MicroFEM. Met MicroFEM kunnen zowel stationaire als niet-stationaire berekeningen worden uitgevoerd. Het programma werkt volgens het principe van eindige elementen (Finite Elements Model). In het model wordt de bodemopbouw geschematiseerd tot watervoerende pakketten en weerstandbiedende lagen. In een watervoerende pakket vindt alleen horizontale stroming plaats terwijl over een weerstandbiedende laag alleen verticale stroming mogelijk is. Met MicroFEM kunnen alleen stijghoogten in de watervoerende lagen berekend worden. Een stijghoogteberekening in een scheidende laag is niet mogelijk. MicroFEM is een gevalideerd modelprogramma. Informatie over MicroFEM is te vinden op het internet onder adres: <http://www.microfem.com>.

MLPU

Om de hydrologische effecten van een energieopslag te berekenen, kan gebruik worden gemaakt van het hydrologische softwarepakket MLPU (Multi Layer Program Unsteady state). Dit is een analytisch grondwaterstromingsmodel voor de modellering van zowel stationaire als niet-stationaire stroming in gespannen, semi-gespannen en freatische watervoerende pakketten. In het model wordt de bodemopbouw geschematiseerd tot isotrope (=gelijke bodemeigenschappen in x- en y-richting) watervoerende pakketten en weerstandbiedende lagen. In een watervoerend pakket vindt alleen horizontale stroming plaats terwijl over een weerstandbiedende laag alleen verticale stroming mogelijk is. Met MLPU kunnen alleen stijghoogten in de watervoerende lagen berekend worden. Een stijghoogteberekening in een scheidende laag is niet mogelijk. MLPU is een gevalideerd modelprogramma. Informatie over MLPU is te vinden op het internet onder adres: http://ourworld.compuserve.com/homepages/philip_nienhuis/.

De keuze van het grondwaterstromingsmodel is afhankelijk van de probleemstelling. Om bijvoorbeeld exact de stijghoogteverandering op de boorgatwand van een bron te bepalen dient bij voorkeur een analytisch model gebruikt te worden (bijvoorbeeld MLPU). Ruimtelijke variaties in bodemparameters kan in MLPU niet ingevoerd worden en kunnen dus niet gemodelleerd worden. Een ander modelleringsprogramma dient gekozen te worden, bijvoorbeeld MicroFEM of Modflow.

Meestal kan worden uitgegaan van het superpositiebeginsel. Dit houdt in dat de stijghoogteveranderingen worden berekend die, indien gewenst, bij het bestaande isohypsenpatroon kunnen worden opgeteld.

2.3.3 Keuze watervoerend pakket

Bij de keuze van het watervoerende pakket spelen vier randvoorwaarden een belangrijke rol:

1. beschikbare dikte van het pakket;
2. grondwaterkwaliteit;
3. voorkoming opbarsten van de bodem/wateroverlast;
4. effecten op andere belangen (zie paragraaf 2.4);
5. provinciaal beleid (zie tab 4).

Ad 1. Beschikbare dikte van het pakket

- Dun pakket Alleen toepassing van korte filterlengtes mogelijk. Bij grote opslagprojecten (100 m³/h) kan dan niet met één doublet worden volstaan; er zijn meerdere doubletten nodig.
- Dik pakket lange filterlengtes toe te passen, zodat met een beperkt aantal bronnen, wellicht met één doublet, kan worden volstaan.
- Onvolkomen filters bij freatische pakketten kan de totale dikte niet volledig worden benut voor het plaatsen van filters.
- Volkomen filters bij semi-gespannen pakketten kan de totale dikte volledig worden benut voor het plaatsen van filters.

Ad 2. Grondwaterkwaliteit

- De redoxgrens Dit is de scheiding tussen zuurstof- en ijzerhoudend grondwater of tussen nitraat- en ijzerhoudend grondwater. Bij plaatsing van het bronfilter over de redoxgrens zal verstopping van het bronfilter plaatsvinden door vorming van ijzeroxyde als gevolg van menging van twee soorten grondwateren.
- Zoet/brakgrensvlak Komt met name in de westelijke provincies voor. Het verplaatsen van dit grensvlak ten gevolge van het onttrekken en infiltreren moet in principe worden voorkomen.

Ad 3. Voorkoming opbarsten van de bodem/wateroverlast

- Opbarsten van de bodem Bij ondiepe semi-gespannen en, in mindere mate, bij freatische pakketten is opbarsten van de bodem tijdens infiltratie mogelijk bij te ondiepe plaatsing van de filters. Er dient rekening te worden gehouden met de maximale

injectiedruk (zie hoofdstuk 3 'Civiele Techniek'). Ook hier is geen volledige benutting van het pakket mogelijk en dus moet rekening worden gehouden met het partiële effect.

- Voorkoming wateroverlast Bij freatische pakketten kunnen de filters niet over het hele pakket worden geplaatst, dit ter voorkoming van te hoge grondwaterstanden tijdens infiltratie (voorkoming van water aan maaiveld). Bij het ontwerp dient rekening te worden gehouden met het partiële effect.

2.4 Effecten energieopslag

Het gebruik van het grondwater voor energieopslag heeft gevolgen voor het grondwater. De gevolgen bestaan met name uit stijghoogteveranderingen, grondwaterstandsveranderingen, zettingen, temperatuursveranderingen en mogelijke watersamenstellingsveranderingen. Als het betreffende project vergunningplichtig is in het kader van de Grondwaterwet dan dient de vergunningaanvraag vergezeld te gaan van een effectenstudie waarin deze invloeden gekwantificeerd zijn en beschreven worden. Voor een overzicht van wet- en regelgeving betreffende energieopslag wordt verwezen naar het rapport onder tab 7. In deze paragraaf wordt een beknopte beschrijving gegeven van de mogelijke effecten en hoe deze gekwantificeerd kunnen worden. De effecten dienen in een zo vroeg mogelijk stadium besproken te worden met de Provincie (vergunningverlener in het kader van de Grondwaterwet), zodat de installatie eventueel nog aangepast kan worden naar aanleiding van eisen van de provincie.

In de effectenstudie dient ook te worden aangegeven welke andere belangen mogelijk beïnvloed kunnen worden. De belangrijkste andere belangen zijn de volgende:

- overige winningen en/of andere energieopslagsystemen;
- natuur, stadsgroen of landbouw welke mogelijk gevoelig is voor grondwaterstandsveranderingen en veranderingen in kwelstromingen;
- eventueel aanwezige bodem- en/of grondwaterverontreinigingen;
- aanwezige bebouwing en infrastructuur die mogelijk gevoelig is voor zettingen en/of veranderingen in de stijghoogte (tunnels et cetera);
- veranderingen inzake grondwaterkwaliteit;
- effect op polderregime.

Speciale aandacht is nodig voor situaties waar de energieopslag in of dicht bij restrictiegebieden ligt, bijvoorbeeld bij grondwaterbeschermingsgebieden of attentiegebieden. Hier gelden speciale regels. Deze gebieden en regels zijn aangegeven in de Provinciale Milieuverordeningen (PMV's) en de provinciale beleidsdocumenten (zie ook tab 'Wet en regelgeving').

2.4.1 Hydrologische effecten

Stijghoogteveranderingen, grondwaterstandsveranderingen en stromingsveranderingen (kwel/inzijing et cetera) worden gerekend tot de hydrologische effecten. De stijghoogte daalt rond de onttrekkingsbron en stijgt rond de infiltratiebron. Afhankelijk van de bodemopbouw, debiet, tijdsduur et cetera kan deze verandering zich doorzetten naar het

ondiepe grondwater. De onttrekking en infiltratie kunnen ook leiden tot veranderingen in de omvang van kwel of inzijing. Dergelijke hydrologische effecten kunnen berekend worden met modellen zoals Modflow, MicroFEM, MLPU, MLAEM et cetera. De grondwater- en stijghoogteveranderingen dienen op een topografische ondergrond gepresenteerd te worden.

2.4.2 Zettingen

Tijdens het onttrekken van grondwater treden stijghoogteverlagingen op. Bij aanwezigheid van scheidende lagen kunnen deze verlagingen leiden tot zettingen van de bodem. Met name wanneer de scheidende laag veel veen bevat is de kans op zetting groot. Dit betekent dat bij grondwateronttrekkingen bepaald moet worden in hoeverre de grondwaterstandsverlagingen zetting van het maaiveld tot gevolg hebben. In het geval van energieopslag is de grondwaterstandsveranderingen niet overal in de omgeving even groot. Hierdoor treedt per locatie een andere zetting op. Het verschil in zetting tussen twee punten in de nabijheid van de onttrekkingsbron is met name bepalend of schade aan constructies/gebouwen zal optreden.

Zettingen kunnen berekend worden aan de hand van de formule van Von Terzaghi. Hierbij wordt opgemerkt dat via deze formule altijd de eindzetting wordt berekend. Gezien het feit dat het koude-/ warmteopslagsysteem halfjaarlijks omwisselt, is het niet te verwachten dat binnen één seizoen de eindzetting wordt bereikt. Een exactere berekening kan worden uitgevoerd met Koppejan. Via deze formule wordt tijdsafhankelijk gerekend.

2.4.3 Thermische effecten

De thermische effecten bestaan uit het opwarmen en/of afkoelen van de bodem rond de bronnen. Energieopslag bevindt zich meestal zo diep onder het maaiveld dat effecten in de wortelzone niet significant zijn. De grootte van het invloedsgebied van de energieopslag is met name van belang voor bestaande en toekomstige grondwatergebruikers. Het thermisch invloedsgebied dient te worden berekend met een daartoe geschikt model, zoals bijvoorbeeld HstWin 2D/T3D. Het thermisch invloedsgebied dient op een topografische ondergrond gepresenteerd te worden.

2.4.4 Effecten op grondwaterkwaliteit

De energieopslag kan water van verschillende samenstelling aantrekken en mengen. Dit kan tot verzilting leiden (menging zoet/zout) of tot extra verspreiding van verontreinigingen (menging schoon/verontreinigd). De beschikbare gegevens dienen onderzocht te worden ten aanzien van dit aspect. Indien het gevaar voor ongewenste menging reëel is, dient de invloed gekwantificeerd te worden en gepresenteerd in de effectenstudie.

De energieopslag verpompt grondwater door een warmtewisselaar waar het grondwater warmte afstaat en opneemt. Deze wisselaar kan als gevolg van een calamiteit gaan lekken. Hoewel de kans op een dergelijke lekkage klein is, dient toch rekening gehouden te worden met dit risico als er zich aan de andere kant van de warmtewisselaar stoffen bevinden die ongewenst zijn in het grondwater. De mate van zekerheid die moet worden ingebouwd om het lekkagerisico zo veel mogelijk te minimaliseren dient in overleg met de provincie te worden vastgesteld. Gebruikelijke eisen zijn: overdruk in het grondwater ten

opzichte van het secundaire circuit, monitoren van de betreffende stof in het grondwater et cetera.

2.4.5 Effecten op het energieverbruik en de emissie van CO₂

Het is verstandig (maar niet strikt noodzakelijk) om in de effectenstudie ook aan te geven wat de positieve effecten zijn van de energieopslag ten aanzien van energiebesparing en emissiereductie van CO₂.

Richtlijn ontwerp op basis van thermische aspecten

Als een energieopslag in het kader van de Grondwaterwet vergunningplichtig is, dienen de effecten van de opslag gekwantificeerd te worden. De belangrijkste effecten zijn stijghoogteveranderingen, grondwaterstandsveranderingen, zettingen, temperatuursveranderingen en mogelijke watersamenstellingsveranderingen.

3 Civiele techniek

3.1 Ontwerpcriteria bronnen

3.1.1 Bronontwerp

De maximaal toelaatbare snelheid op de boorgatwand wordt bepaald door de volgende factoren:

- maximaal debiet;
- doorlatendheid (k-waarde);
- belasting-duurcurve;
- verstoppingspotentie grondwater;
- dikte van het opslagpakket.

Dit betekent globaal dat voor projecten die veel draaiuren maken, in een pakket zitten met een lage k-waarde en waarvan het water een hoog verstoppingspotentie bezit, een lage stroomsnelheid moeten hebben. Aan de andere kant projecten met weinig draaiuren en een hoge k-waarde kunnen hoge stroomsnelheden accepteren.

In een Novem-studie is een nieuwe ontwerpnorm voor infiltratiebronnen afgeleid (lit. 3):

$$v_{ontw} = 1000 (k/150)^{0,6} \sqrt{(v_v / (2 * MFI_{mea} * u_{eq}))}$$

v_{ontw} :	ontwerpsnelheid [m/h]
k:	doorlatendheid van het watervoerende pakket [m/d]
v_v :	specifieke verstoppingsnelheid [m/a]
MFI_{mea} :	gemeten MFI [s/l^2]
u_{eq} :	aantal equivalente vollasturen [h] per jaar

De afleiding van deze ontwerpnorm staat beschreven in het bovengenoemde rapport.

Als geen MFI bekend is kan voor energieopslag (waarbij grondwater wordt geïnfilteerd, en geen oppervlaktewater) uitgegaan worden van een MFI van 2. In de meeste gevallen is de MFI van grondwater dat onttrokken wordt aan goed schoon gepompte bronnen lager dan 2. Incidenteel worden hogere MFI's gemeten (3 tot 4). In dat geval zou iets vaker onderhoud plaats moeten vinden. Voorgesteld wordt om als standaard toegelaten verstoppingsnelheid een waarde van 0,1 m/jaar aan te nemen. Indien gewenst kunnen hogere of lagere verstoppingsnelheden worden aangehouden, dit vertaalt zich dan in een infiltratiebron met een kleinere respectievelijk grotere diameter.

In dezelfde studie (lit. 3) is een norm voorgesteld voor *onttrekkingsbronnen*:

$$v_b = k / 12$$

Waarin v_b de ontwerpsnelheid op de boorgatwand is (in m/h) en k de gemiddelde doorlatendheid in m/d.

3.1.2 Injectiedruk, bodemsplijting, onderloopsheid, verstopping

Injectiedruk, bodemsplijting en onderloopsheid

Injectiedruk is de druk die nodig is om grondwater in een bron te injecteren, waarbij een toelaatbare stijghoogteverandering van het grondwater in de bron optreedt. De stijghoogteverandering dient hierbij zodanig te zijn dat schade aan een bron wordt voorkomen. Dit betekent dat het geïnjecteerde grondwater in voldoende mate horizontaal in de formatie (het watervoerende pakket) moet kunnen stromen.

Als de bron verstopt, zal het grondwaterniveau in de bron stijgen. De druk in de bron neemt toe. Bij onbelemmerde druktoename zal de bodem vervolgens gaan splijten. Het splijten of opbarsten van de bodem betekent dat de grondmechanische situatie van de verticaal weerstandbiedende lagen ernstig is verstoord. De verstoring van de bodem (of scheuren) uit zich veelal verticaal omhoog richting maaiveld.

Vervolgens zal het geïnfiltreerde water via deze verstoringen/scheuren in verticale richting langs de bron (in de omstorting), maar soms ook op andere plaatsen in de buurt van de bron, omhoog verplaatsen. De bron is hiermee onderloops geworden (zie figuur 3.1).

Het voorkomen van bodemsplijting

Bodemsplijting kan voorkomen worden door de injectiedruk te beperken. De maximale (toelaatbare) injectiedruk volgt uit een bodemevenwichtsberekening, waarbij de druk (alzijdig) van het korrelskelet altijd hoger dient te zijn dan de waterspanning.

De spanningen in een punt in de bodem zijn normaal gesproken niet in alle richtingen gelijk. In sedimenten bestaande uit ongeconsolideerde zanden en kleien is de horizontale spanning de kleinste. Het verhogen van de waterspanning in de formatie kan betekenen dat de horizontale korrelspanning tot nul reduceert, waardoor de bodem instabiel wordt. Deze instabiliteit manifesteert zich loodrecht op de richting met de laagste korrelspanning. In dit geval verticaal, hetgeen betekent dat de bodem van de bron wordt weggedrukt.

Om te bepalen welke maximale stijghoogteveranderingen ter hoogte van het meest kritische punt onder maaiveld mogen optreden is het nodig de horizontale korrelspanning te kennen. Dit meest kritische punt is de bovenzijde van de filteromstorting of de onderzijde van de scheidende laag.

De horizontale spanning (σ_{kh}) kan met behulp van de wet van Coulomb worden bepaald uit de verticale korrelspanning (σ_{kv}). Deze laatste kan weer bepaald worden uit de grondspanning en de waterspanning. Deze formules worden in Olsthoorn (KIWA-mededeling nr. 71, Verstopping van persputten) en andere literatuur over grondmechanica omschreven.

In de regel kan worden gesteld dat als de injectiedruk (in mwk) niet meer bedraagt dan een vijfde van de diepte van de top van het filter, bodemsplijting niet zal optreden. Als vuistregel kan worden aangehouden dat:

maximale (toelaatbare) stijghoogteverandering = $0,2 \cdot$ diepte van de top van het filter.

In de literatuur wordt erop gewezen dat deze vuistregel van toepassing is op formaties die tot aan maaiveld uit materiaal bestaan met een volumieke dichtheid van circa 2.000 kg/m^3 . Bij andere omstandigheden dient de bodemevenwichtsberekening te worden uitgevoerd.

Wanneer een bron verstopt zal dit veelal optreden op de boorgatwand. Dit betekent dat de bij verstopping optredende extra stijghoogteverhoging zal drukken op de omstorting boven het filter. Het risico van onderloops raken van een bron kan verkleind worden door het gewicht van de omstorting boven het filter zwaar te maken. Bijvoorbeeld zodanig dat de σ_{kv} voor de omstorting groter is dan de σ_{kv} van de bodem zelf. Lukt dit niet met zand en klei, dan is het toepassen van bijvoorbeeld onderwaterbeton een optie. Ten aanzien van voornoemde gewicht dient rekening te worden gehouden met een marge van factor 1,2 tot 2 om de maximale toelaatbare stijghoogteverandering te kunnen weerstaan.

Het risico van bodemsplijting neemt met name toe bij een opslagsysteem:

- op geringe diepte;
- met een groot injectiedebiet per bron;
- in een aquifer met een lage kD -waarde;
- met een grote afstand tussen de koude en warme bron.

Verstopping

Het verstopping van de bron zorgt ervoor dat het grondwater onvoldoende in de formatie kan stromen. In de literatuur worden verschillende oorzaken aangegeven waardoor bronnen kunnen verstopping:

1. zwevende (gesuspendeerde) deeltjes van allerlei aard, die accumuleren rondom de bron;
2. gas, bijvoorbeeld luchtbellen of methaan;
3. chemische neerslagvorming in het watervoerende pakket door reacties tussen verschillende watertypen;
4. groei van bacteriën en de vorming van biologische neerslagen in de bron, de omstorting en de eerste cm's van het watervoerende pakket;
5. verandering van de opbouw van het korrel skelet (porositeit) onder invloed van de stroming.

Een opmerking hierbij is dat de laatste twee oorzaken zelden voorkomen bij energieopslagsystemen.

Richtlijn ontwerpcriteria bronnen

Bepaal de snelheid op de boorgatwand op basis van maximaal debiet, doorlatendheid, belasting-duurcurve, verstoppingspotentie grondwater en de dikte van het pakket.

Rekening dient te worden gehouden met injectiedruk en bodemsplijting bij opslagsystemen op een geringe diepte, met een groot injectiedebiet per bron, in een aquifer met een lage kD -waarde en/of met een grote afstand tussen de koude en warme bron.

3.2 Boren

3.2.1 Boortechnieken

Spoelen (straight flush)

Bij het spoelboorsysteem (of ook wel spuitboren genoemd) wordt de boorspoeling door de holle boorstang naar beneden gepompt. Het door de draaiende boorbeitel losgewoelde materiaal wordt met de spoeling mee naar boven genomen. Deze vloeistofmassa stroomt door de ruimte tussen de boorstang en de boorgatwand.

Bij het boren met grotere diameters zal door de geringe opwaartse snelheid van de spoeling ontmenging optreden. De grovere materialen zullen achterblijven, terwijl de fijnere wel worden meegevoerd. De bemonstering van het vrijkomende sediment is derhalve onnauwkeurig.

Spoelen is een snelle en daardoor relatief goedkope methode.

Zuigboor- en luchtliftsysteem (reversed flush)

Bij deze boormethode stroomt de boorspoeling door de holle boorstang in tegengestelde richting als bij spoelen. Deze methode wordt daarom ook wel aangeduid als indirect spoelen ('reversed flush') in tegenstelling tot direct spoelen ('straight flush'). De losgemaakte grond wordt via een vuilwater (centrifugaal)pomp in een spoelvijver of spoelbak gepompt die in verbinding staat met het boorgat.

Om de boring sneller te laten vorderen en om grotere diepten te kunnen bereiken, kan gebruik worden gemaakt van een luchtlift. Bij het luchtliftsysteem wordt door middel van een compressor lucht geperst onder in de boorstang, boven de boor. Door de toevoeging van lucht wordt de gemiddelde massadichtheid van de vloeistofkolom verlaagd, waardoor een omhoog gerichte stroming ontstaat. Het effect van de luchtlift neemt toe met de diepte.

Doordat het boorgruis langs de snelste weg (de boorstangen) omhoog wordt gebracht kunnen betere grondmonsters worden genomen dan bij een spoelboring.

Pulsboring

Bij een puls boring wordt een boorbuis ter grootte van het beoogde boorgat in de grond gebracht. De boorbuis kan afhankelijk van de boordiepte en diameter bestaan uit PVC of staal. De voorloper (snijschoen) is gemaakt van gehard staal, eventueel voorzien van tanden.

De boorbuis wordt met behulp van een draaiende of een schudbeweging, al dan niet machinaal, in de grond gebracht. Met behulp van een puls die binnen de boorbuis aan een lier hangt, wordt de grond onder in de boorbuis met behulp van een pulserende beweging opgepakt en verwijderd. Afhankelijk van de grondsoort klei, zand of grind, worden verschillende soorten pulsen gebruikt.

Doordat tijdens het boren een mantelbuis wordt meegevoerd kunnen 'schone' grondmonsters worden genomen. De betreffende boortechniek wordt dan ook veel toegepast voor grondonderzoek.

Pulsboringen worden ook wel toegepast op plaatsen waar spoelen niet is toegestaan of niet mogelijk is, bijvoorbeeld bij een dijklichaam, een spoorweg of een middenberm. Ook in het geval dat zeer hoge eisen worden gesteld aan de filteropbouw van de put verdient een pulsborings de voorkeur.

Pulsboringen zijn arbeidsintensief en daarom in verhouding zeer kostbaar op het moment dat er sprake is van boringen tot grote dieptes en grote diameters. Hier staat tegenover dat het opstellen relatief snel kan plaats vinden en dat het materieel goedkoper is. Het pulsen van boringen tot circa 50 m met een diameter tot circa 300 mm is totaal gezien goedkoop en vergelijkbaar met een zuigborings (met dezelfde diepte en diameter).

Voor- en nadelen

In tabel 3.1 zijn de voor- en nadelen van de verschillende boortechnieken op een rij gezet.

Tabel 3.1 Voor- en nadelen van verschillende boortechnieken

Type boring	Zuigborings	Spoelborings ('straight flush')	Pulsborings
Voordelen	Boren tot 600-800 m-mv mogelijk	Boren tot grote diepte mogelijk	Kleine boorstelling
	Boorgatmeting is mogelijk	Boorgatmeting is mogelijk	Er kunnen goede grondmonsters worden genomen
	Grote boorgatdiameter mogelijk tot 1.200 mm	Goedkoper dan zuigborings	
	Goede controle op het boorgat	Zeer snelle techniek (100 m/d)	Boren door verontreinigingen mogelijk
	Nauwkeurige beschrijving van de bodem		Geen verstoring van de formatie
Nadelen	Veel materieel nodig	Een nauwkeurige beschrijving van de bodem is nauwelijks mogelijk	Geen boorgatmeting mogelijk
	Duurder dan spuitboren	Versmeren boorgat	Diepe boringen duren lang (arbeidsintensief). Hierdoor erg kostbaar.
	Traag bij het boren door dikke kleilagen	Verstoring van de formatie	Het doorboren van kleilagen gaat zeer traag
		Boorgatdiameter beperkt: tot circa 400 mm	
Aandachtspunt	Om goede bemonstering mogelijk te maken moet de boorsnelheid beperkt worden tot 5-7 m/h, alleen in die lagen die relevant zijn		

Aanbevelingen tijdens het boren

Tijdens het boorproces is het belangrijk dat opgepompte klei-, veen- en siltdeeltjes niet terug gebracht worden in het open boorgat. Door de aanwezige overdruk in het boorgat zal automatisch een afzetting op de boorgatwand plaatsvinden. Door toepassing van 2 of meerdere suppletiebakken kunnen deze deeltjes tegengehouden worden.

Ook is het aan te bevelen direct na het passeren van een scheidende- of stoorlaag (of na het op diepte komen van het boorgat) gedurende enige tijd (minimaal 5 minuten) te zuigen zonder dat nieuw sediment wordt losgeboord.

Keuze boormethode

Een belangrijke voorwaarde voor een goed werkend systeem is dat de grondlagen ter hoogte van met name het opslagpakket goed en nauwkeurig kunnen worden bemonsterd en beschreven. De boortechniek moet hier op worden afgestemd. Dit betekent dat zowel het zuigboren als het pulsen aan deze voorwaarde voldoen. Indien echter een afweging wordt gemaakt tussen de kosten, snelheid van boren en grote boorgatdiameters, dan gaat de voorkeur uit naar het zuigboren. Vanwege de versmering bij een spoelboring zal deze techniek niet worden toegepast.

Tevens is het van belang dat men beseft dat de onttrekkings- en infiltratiebronnen water moeten kunnen leveren en opnemen. Hiervoor moet de weerstand van de bron geminimaliseerd worden. Rotary-zuig/luchtliftboren is hierbij in Nederland het best geschikt. Dit in verband met de hier voorkomende zand-, klei- en veenlagen.

Richtlijn keuze boormethode

De boormethode dient zodanig te zijn dat de grondlagen goed kunnen worden bemonsterd. Tevens dient een afweging te worden gemaakt tussen de kosten en snelheid van boren.

3.2.2 Aandachtspunten tijdens uitvoering

Overdruk in het boorgat

Tijdens het boren van het boorgat, het plaatsen van het filter en het aanbrengen van de omstorting dient ten alle tijde te worden voorkomen dat het boorgat invalt. Door voldoende overdruk in het gat te handhaven blijft de boorgatwand stabiel.

Hier wordt vaak water voor gebruikt. Deze overdruk wordt gecreëerd door de waterstand in het boorgat op een hoger niveau te houden dan de optredende stijghoogte in de doorboorde formaties.

Het uitgangspunt is dat het waterniveau in de mantelbuis minimaal 1,5 tot 2 meter boven de stijghoogte van de doorboorde formaties moet staan (bij gelijke dichtheid van het grondwater in de formaties en het *gebruikte werkwater*). Als het grondwater veel zouter is dan het gebruikte werkwater, dient dit gecompenseerd te worden met een hoger waterniveau. Indien er onvoldoende verschil is tussen het waterniveau in de mantelbuis en de formaties, dan dient men dit te compenseren door de boorstelling verhoogd op te stellen of verzwaarde boorspoeling te gebruiken.

Het benodigde werkwater kan op meerdere manieren worden verkregen.

Werkwater

Werkwater kan worden verkregen uit oppervlaktewater (sloot, vijver en andersoortige watergangen) of een brandhydrant van het waterleidingnet.

Indien water wordt onttrokken uit oppervlaktewater, dan dient dit te worden gemeld bij de beheerder van het oppervlaktewater (bijvoorbeeld hoogheemraadschap, waterschap of provincie).

Voor het gebruik van water uit een waterleidingnet dient toestemming te worden gevraagd bij de betreffende waterleverende instantie. Deze kan een standpijp verhuren welke op een kraan kan worden aangesloten. Tegenwoordig hebben de meeste waterleidingbedrijven als beleid dat zij hier geen toestemming meer voor geven. In plaats hiervan zal (eveneens op aangeven van een waterleidingbedrijf) een tijdelijke bouwaansluiting op het waterleidingnet moeten worden aangebracht.

Indien voornoemde opties niet voorhanden zijn, dan kan worden overgegaan op aanvoer van werkwater per tankwagens. Een ander mogelijkheid is om een kleine bron aan te brengen, waaruit vervolgens tijdelijk freatisch grondwater wordt onttrokken.

Boorspoeling en toeslag

Er zijn situaties waarin de boorgatwand niet alleen door overdruk met water in stand en stabiel kan worden gehouden. Hierbij moet gedacht worden aan situaties waarbij sprake is van bijvoorbeeld grove zandlagen (neemt veel water op), het zwellen van doorboorde kleilagen en

watervoerende pakketten met een hoge stijghoogte. In deze gevallen kan de natuurlijke boorspoeling voor extra stabiliteit van de boorgatwand zorgen.

Gesuspendeerde klei afkomstig uit losgewoelde kleilagen zorgt er namelijk voor dat de boorgatwand wordt gecementeerd.

Indien de spoeling van de van nature aanwezige kleilagen niet voldoende is, bestaat de mogelijkheid om spoelingsadditieven toe te voegen. In ieder geval moet de spoeling zodanig zijn samengesteld, dat het mogelijk wordt:

- snel te boren;
- boorgruis mee naar boven te nemen. Spoelingsadditieven zorgen ervoor dat de dichtheid van de spoeling wordt vergroot. Door de dichtheid te vergroten, worden deeltjes en boorgruis eenvoudiger mee naar boven genomen;
- druk uit te oefenen op de boorgatwand. Het vergroten van de dichtheid zorgt er tevens voor dat de druk van de spoeling in het boorgat groter is dan die van het water in de poriën van de formatie;
- te voorkomen dat veel waterverlies optreedt. Door het gebruik van spoeling wordt de boorgatwand afgepleisterd;
- het zwellen van doorboorde kleilagen tegen te gaan.

Er zijn verschillende additieven met verschillende eigenschappen aanwezig. Men kan onderscheid maken in organische en anorganische spoelingsadditieven.

Voorbeelden van organische spoelingen zijn Antisol en CMC.

Het voordeel van deze middelen is dat ze biologisch afbreekbaar zijn en daardoor relatief eenvoudig te verwijderen. Anorganische middelen, zoals bentoniet, zijn daarentegen niet afbreekbaar. Het gevolg is dat het extra moeite kost om deze spoeling tijdens het ontwikkelen te verwijderen. Echter zowel bij organische als anorganische

spoelingsadditieven is de kans aanwezig dat zij in de boorgatwand en formatie dringen en daardoor moeilijk te verwijderen zijn.

Het gebruik van spoelingsadditieven dient zoveel mogelijk te worden voorkomen. Indien dit echter technische problemen oplevert, dan dient te worden overgegaan op *organische* spoelingsadditieven (zoals Antisol).

Boren nabij fundering

Het boren van een boorgat nabij funderingspalen veroorzaakt een ontspanning van de bodem rondom de palen. Het gevolg is dat de draagkracht van de palen nadelig kan worden beïnvloed. Indien er sprake is van boringen binnen een afstand van 10 meter van de paalfundering, dan dient er overleg te worden gevoerd met de bouwkundige constructeur. Deze kan eisen en randvoorwaarden stellen aan deze boring. De bouwkundige constructeur zal de minimale afstand tussen bron en fundering aangeven. Is deze afstand kleiner dan is het mogelijk om een stalen mantelbuis in te trillen tot onder het paalpuntniveau. De boring wordt vervolgens in de mantelbuis uitgevoerd.

Richtlijn uitvoeringszaken

Tijdens het boren dient te worden voorkomen dat het gat hierbij invalt. Bepaal hierbij de benodigde overdruk. Overdruk op het boorgatwand kan op verschillende manieren worden verkregen, bijvoorbeeld voldoende werkwater, het gebruik van spoelingsadditieven en het verhoogd opstellen van de boorstelling.

3.2.3 Bemonstering tijdens boren en boorbeschrijving

Het bemonsteren en beschrijven van de grondlagen (inclusief schatting M50 -cijfers) dient per meter of per laag, indien meerdere lagen per meter voorkomen, te gebeuren. De boorbeschrijving dient te worden beschreven volgens NEN 5104.

Het bemonsteren en beschrijven dient nauwkeurig te gebeuren, omdat deze gegevens aan de basis staan van en bepalend zijn voor een goed detailontwerp van een bron. Uit de boorbeschrijving kan bijvoorbeeld worden opgemaakt hoeveel filterlengte er kan worden geplaatst, hoe groot de sleufbreedte van het filter moet zijn, waar de kleipropen komen et cetera.

Bij het bemonsteren van het uitkomende sediment is een goed samenspel tussen de boormeester en de bemonsteraar belangrijk. De zand en grindmonster worden over het algemeen met een emmer opgevangen. Klei en veendelen kunnen met een net worden gevangen. De boormeester kan aan de (aflees)meters van de boormotor zien of weerstand verhogende of verlagende grondlagen worden aangeboord.

Omdat het sediment met een snelheid van circa 3 meter/seconde door de boorbuizen stroomt zal, met name bij diepere boringen enige tijd overheen gaan voordat het sediment bemonsterd kan worden. De boormeester dient de bemonsteraar hiervan tijdig van op de hoogte te brengen zodat afwijkende grondlagen gerapporteerd kunnen worden. Er moet nauwgezet gewerkt worden zodat het pompfilter in de juiste zandlaag geplaatst kan worden. Zonodig is het mogelijk de exacte diepte van specifieke grondlagen (bijvoorbeeld klei) door middel van een boorgatmeting te controleren. Met name als twijfel bestaat aan het gerapporteerde resultaat of indien onvoldoende

watervoerende lagen beschikbaar zijn worden boorgatmetingen (meestal door het onafhankelijk instituut NITG/TNO) uitgevoerd.

Richtlijn bemonstering tijdens boren en boorbeschrijving

Bepaal de M50-cijfer van de grondlagen (per meter) ten minste het filterpakket, inclusief de scheidende lagen en deklaag. Het inschatten van het M50-cijfer moet na drogen met behulp van bijvoorbeeld een zandliniaal worden uitgevoerd.

De boorbeschrijving dient te worden beschreven volgens NEN 5104. Op basis van de boorbeschrijving dient de filterstelling te worden bepaald.

3.3 Bronnen

3.3.1 Filterbuis, stijgbuis en pompkamer

Algemeen

Een bron is uit verschillende onderdelen opgebouwd. Het een en ander is in figuur 3.2 weergegeven. Veelal worden de buizen in PVC uitgevoerd. PVC biedt een aantal voordelen ten opzichte van andere materialen (zoals bijvoorbeeld RVS):

- relatief goedkoop;
- in hoge mate bestand tegen veel chemische stoffen en bacteriologische invloeden;
- relatief licht van gewicht;
- gemakkelijk te bewerken;
- goed te lijmen;
- gemakkelijk en snel te monteren;
- levert waterdichte verbindingen op;
- voldoende sterk voor normale omstandigheden.

Zandvang

De zandvang bevindt zich aan de onderzijde van de bron en bestaat uit een blinde buis met een lengte van minimaal 1,0 m. De onderkant van de zandvang is afgedicht. De zandvang dient te worden beschouwd als een vorm van bezinkvoorziening. Zanddeeltjes worden hierin opgevangen, zodat deze het filter niet meer kunnen belemmeren. De zandvang dient dan ook, met name in de beginfase van het ontwikkelen, goed te worden schoongemaakt.

Filterbuis

Het filter is het geperforeerde gedeelte ter hoogte van het opslagpakket. Hierdoor kan het grondwater binnenstromen. De volgende eisen dienen aan het filter te worden gesteld:

- het tegenhouden van het filtergrind uit de formatie, terwijl het te winnen water kan binnentreden;
- chemisch inert zijn;
- de intreeweerstand moet zo laag mogelijk zijn.

Als stelregel kan worden aangehouden dat de perforatie van het filter 0,1 - 0,2 mm onder de fijnste fractie van de omstorting moet zitten.

De grootte van de sleufbreedte is afhankelijk van de wanddikte van de buis en de fractie van het filtergrind. Smalle sleuven kunnen niet in een dikwandige buis worden aangebracht. De cirkelzaag, die de sleuven in de buizen zaagt, zal gaan 'slingeren', waardoor de sleuven onnauwkeurig worden. Leveranciers van filterbuizen kunnen precies aangeven wat de kleinste sleufbreedtes zijn bij de verschillende wanddiktes. De filterspletten kunnen of in horizontale (dwarssleuven; loodrecht op de lengteas van het filter) of in verticale richting (langs sleuven; evenwijdig aan de lengteas) worden aangebracht.

Bij levering van de filterbuis is het raadzaam om met behulp van een 'voeler' de sleufbreedte te controleren. Bij toepassing van een filterbuis met een verkeerde perforatie kunnen de infiltratiebronnen dichtslibben.

Aan de hand van de grondlagenstaat met M50-cijfers, eventueel ondersteund met een boorgatmeting kan een filterstelling gemaakt worden. Dit is een nauwgezet werk. Het verdient dan ook de voorkeur dat dit in het werk wordt opgetekend zodat fouten bij de daadwerkelijke inbouw van de bronbuizen zoveel mogelijk wordt voorkomen. Tijdens het inbouwen van de bronbuis dient geregeld gepeild te worden, ter bevestiging van de juiste maatvoering van het bronfilter. Indien in het werk blijkt dat fouten zijn gemaakt dient terstond een en ander gemeld te worden zodat corrigerend kan worden opgetreden. Omdat een bepaalde mate van onnauwkeurigheid bestaat in de rapportage van de grondlagenstaten is het aan te bevelen om minimaal 1 meter van ongeschikte zandlagen weg te blijven. Bij boringen met diepten groter dan 150 m dient minimaal 2 meter aangehouden te worden.

Filter met horizontale sleuven

Het voordeel van buizen met horizontale sleuven is dat de buizen bestand zijn tegen de druk van de formatie die op de buitenzijde van de filterbuis wordt uitgeoefend. Het nadeel is dat dwarssleuven een verzwakking geven evenwijdig aan de lengteas. Hierdoor hangt het gewicht van de buizen tijdens montage aan een verzwakte horizontale doorsnede. Een andere (minder bekend) nadeel is dat de buizen, tijdens het laden en lossen, langs elkaar heen schuiven, waardoor de kans bestaat dat de sleuven van de buizen onderling aan elkaar blijven haken. Het gevolg is dat er beschadiging van de sleuven optreedt.

Filter met verticale sleuven

Het voordeel van verticale sleuven is dat hier minder sprake is van een verzwakte constructie evenwijdig aan de lengteas (horizontale doorsnede). De bronnen voor een energieopslag worden vrijwel altijd voorzien van filters met verticale filterspletten.

Stijgbuis/pompkamer

Het deel vanaf het filter tot aan het maaiveld is de stijgbuis. In het bovenste gedeelte van de stijgbuis bevindt zich de onderwaterpomp en andere leidingen. Dit deel van de stijgbuis wordt ook wel pompkamer genoemd. De pompkamer heeft meestal een grotere diameter dan de stijgbuis. De diameter van de pompkamer wordt bepaald op basis van de grootte van de verschillende onderdelen die in de pompkamer worden geplaatst. Hierbij moet worden gedacht aan de onderwaterpomp, de pers- en injectieleiding(en),

meetbuis en de voedingskabel van de onderwaterpomp. De buizen met verschillende diameters worden door middel van een verloop met elkaar verbonden.

Om een afdichting op de pompkamer te maken wordt over het algemeen een bronplaat gebruikt. Deze bronplaat kan door middel van een flensverbinding of een andere constructie op de pompkamer worden gemonteerd.

Peilbuis

In de omstorting van de bron wordt minimaal één peilbuis geplaatst. Deze dient in het midden tussen de pompkamer c.q. stijg- en filterbuizen en de boorgatwand te worden geplaatst. De peilbuis heeft meerdere doeleinden, zoals bijvoorbeeld het meten van de stijghoogte, bepalen van de grondwaterkwaliteit en het meten van de bodemtemperatuur. De peilbuis wordt voorzien van 2 m filter, welke zich in het opslagpakket (dus in het filtergrind) moet bevinden.

Centreerringen

De buizen dienen gecentreerd in het boorgat te worden geplaatst. Dit wordt bereikt door het gebruik van centreerringen. De ringen worden veelal om de 5 m om de buis aangebracht.

Aandachtspunten

Drukklasse

Op basis van rekenwerk van Olsthoorn met betrekking tot bezwijkdrukken bij kortstondige belastingen (bv. jutteren) is de onderstaande formule gedefinieerd.

$$P = (2 * E / (1 - \mu^2)) * (d / D)^3 * e^{-0,009\alpha}$$

E: elasticiteitsmodule voor kortdurende belasting [$3 \cdot 10^9$ N/m²]

μ : constante van Poisson = 0,4 [-]

P: uitwendige bezwijkdruk [N/m²]

d: dikte van de wand [m]

D: diameter van de buis berekend vanaf het midden van de buis [m]

α : excentriciteit = het percentage dat de afwijking aangeeft van een werkelijk ronde buis [-]

Voor α kan 0 gebruikt worden indien een veiligheidsfactor van 0,5 wordt toegepast (Olsthoorn, pg. 457). De relatie tussen drukklasse en stijghoogteverlaging is weergegeven in tabel 3.2.

Tabel 3.2 Drukklasse in relatie tot de verlaging

Drukklasse (PN)	Maximale verlaging (theor.) (mwk)	Maximale verlaging (prakt.) (mwk)
16	250	125
12,5	78	39
10	41	20
7,5	19	10
6,3	11	5,5

Verbindingen

Bij het verbinden van de PVC-buizen dienen de voorschriften voor het verwerken van deze buizen in acht te worden genomen. De buizen kunnen onderling met lijmverbindingen met elkaar verbonden worden. Hiervoor worden de buizen aan de ene uiteinde voorzien van een tromp en aan de andere uiteinde een spie. De tromp is het aan de buis gevormde verwijde deel. Vervolgens wordt de tromp van een buis en de spie van een andere buis voorzien van lijm, waarna de spie in de tromp wordt geschoven. Deze lijmverbinding is, behalve snel en eenvoudig uit te voeren, ook nog sterk en water- en zanddicht. Als teveel lijm wordt gebruikt bij de verbinding van de spie en tromp wordt het teveel aan lijm naar buiten geperst.

De tromp-spieverbinding zorgt er tevens voor dat de buizen in zijn geheel worden voorzien van dezelfde inwendige doorlaat. Omdat de bronnen verticaal worden ingebouwd zullen de verbindingen direct volop belast worden. De spie-tromp afmetingen moeten daarom exact op elkaar zijn afgestemd. In de praktijk is dit mogelijk bij afname van deze bronbuizen bij leveranciers die deze spie-tromp verbindingen speciaal maken.

Het verbinden van de buizen door middel van schroefdraad (kordel of blokdraad) wordt minder vaak gebruikt. Deze verbindingen zijn bij m.n. grotere diameters over het algemeen niet waterdicht. Hierdoor kan vermenging van waterlagen optreden en een vervuiling van de bronnen.

Richtlijn PVC-buizen

- Bepaal de sleufbreedte van het filter. Deze dient te worden afgestemd op de omstorting.
- De buizen dienen onderling met een lijmverbinding met elkaar te worden verbonden.
- *De drukklasse van de buizen dient te worden afgestemd op de diepte van de boring en de verwachte stijghoogteverlaging.*

3.3.2 Omstorting

Algemeen

De ruimte tussen de boorgatwand en de filter- en stijgbuis dient te worden aangevuld met verschillende soorten omstortingsmateriaal. Dit is afhankelijk van de bodemopbouw van de formatie, waarin het boorgat is geboord. Het aanbrengen van de omstorting gebeurt via een storkoker. Deze zorgt ervoor dat het aanvulmateriaal de boorgatwand niet beschadigt en dat het materiaal eenvoudig en op de juiste diepte wordt aangebracht.

Filtergrind

Het filtergrind wordt rondom het filter aangebracht en moet voorkomen dat zand uit de formatie in het onttrokken water komt. De selectie van de omstorting moet zich met name richten op de fijnste fractie van de formatie. Toch zal de omstorting nooit de allerfijnste delen tegenhouden. Deze fractie moet tijdens het ontwikkelen tot op een zodanig afstand van de bron worden verwijderd dat deze niet meer kan gaan meestromen. Tevens dient bij het bronontwerp rekening te worden gehouden met de dikte van de omstorting. Een te dunne omstorting veroorzaakt zanddoorbraak en een te dikke omstorting bemoeilijkt het ontwikkelen van de bron. De dikte van de omstorting is afhankelijk van het boorgatdiameter in combinatie met de diameter van het filter.

De grofheid van het filtergrind dient te worden afgestemd op de zandlagen met het kleinste M50-cijfer. In de literatuur wordt een groot scala aan normen gevonden. De meest gehanteerde norm hiervan is (lit. 3):

$$D50/d50= 4 \text{ à } 5$$

D50: fractie van het omstortingsmateriaal (filtergrind)

d50: fractie van de fijnste zandlaag in het filtertraject (het M50-cijfer)

Het filtergrind dient minimaal 1 meter boven het filter te beginnen en minimaal 1 meter onder het filter te eindigen.

Aanvulgrind

Het aanvulgrind wordt als omstorting, ter hoogte van zandlagen en plaatsen waar geen klei en filtergrind is aangebracht, rondom de stijgbuis en pompkamer aangebracht.

Klei

Doorboorde kleilagen dienen weer afdoende te worden afgedicht. Dit gebeurt door het aanbrengen van kleikorrels. Op het moment dat deze kleikorrels in aanraking komen met water, kunnen de korrels gaan zwellen tot (afhankelijk van de soort klei) een verdubbeling van hun oorspronkelijke volume.

Onderwaterbeton

Om meer gewicht te geven aan de omstorting boven het filter (waardoor de kans op onderloops raken van een bron wordt verminderd) is het mogelijk om in plaats van aanvulgrind en klei onderwaterbeton toe te passen. Het aanbrengen hiervan dient laagsgewijs plaats te vinden.

Richtlijn omstorting

- *Het aanbrengen van de omstorting dient te gebeuren met een stortkoker.*
- *Bepaal de grofheid van het filtergrind op basis van de zandlagen met de kleinste M50-cijfer.*
- *Doorboorde kleilagen dienen weer afdoende te worden afgedicht.*
- *Om de kans op onderloops raken van een bron te verkleinen, kan meer gewicht worden gegeven aan de omstorting door onderwaterbeton toe te passen.*

3.4 Ontwikkelen bronnen

3.4.1 Verschillende ontwikkelmethodes

De bronnen dienen zodanig te worden schoongepompt en ontwikkeld dat ze geschikt zijn voor het langdurig onttrekken en infiltreren van grondwater op ontwerpcapaciteit.

In de literatuur wordt meerdere keren gewezen op het grote belang van het omkeren van de stroming tijdens het ontwikkelen van bronnen.

Langdurig schoonpompen op hoge capaciteit wordt sterk afgeraden omdat hierbij zandbruggen ontstaan die de doorlatendheid verkleinen (met andere woorden de bron

levert geen zand, maar de capaciteit is gering). Goede resultaten wordt bereikt bij het toepassen van de volgende ontwikkelmethodes:

Schoonpompen met gering debiet en langzaam opvoeren tot ontwerpcapaciteit

Deze actie is gericht op het verwijderen van boorspoeling uit de omstorting en dient als eerste plaats te vinden. De voorkeur is om deze actie zo snel mogelijk na het gereed zijn van de bron uit te voeren.

Jutten

Door perslucht in de bron aan te brengen wordt een druk in de bron opgebouwd. Hierdoor zal de grondwaterstand in de bron worden verlaagd. Vervolgens wordt de druk plotseling verwijderd, waardoor de waterstand omhoog schiet. Deze actie is gericht op het breken van de filterkoek. De mate van de druk tijdens het jutten (en dus verlaging van de grondwaterstand) is afhankelijk van de drukklasse van het PVC en de filterdiepte.

Sectiegewijs ontwikkelen en rondpompen

Bij deze actie wordt het filtertraject per sectie ontwikkeld. De lengte van een sectie varieert van 1,5 tot 2,0 m. De capaciteit van het sectiepomp moet afhankelijk worden gesteld van de doorlatendheid. Deze actie is gericht op het verwijderen van ondermaats fijn zand en de filterkoek. Bij het sectiegewijs ontwikkelen wordt water uit een sectie onttrokken en vervolgens geloosd. Bij het sectiegewijs rondpompen wordt eveneens water onttrokken uit een sectie, maar zal een deel weer in een andere (bovenliggende) sectie worden geïnfilteerd. Het rondpompen veroorzaakt een steeds wisselende stromingsrichting als het sectie-apparaat op en neer wordt gehaald.

Intermitterend pompen

Bij deze methode staat de onderwaterpomp niet continu aan om grondwater te onttrekken. Door de pomp op intermitterend in te schakelen zal de pomp gedurende een aantal minuten in werking zijn om vervolgens weer uit bedrijf te gaan. Dit duurt eveneens enkele minuten. Deze actie is met name gericht op het verwijderen van de boorspoeling die in de formatie is gekomen voordat de boorgatwand werd gepleisterd.

Aansluitend aan het ontwikkelen dient een capaciteitsproef in elke bron te worden uitgevoerd gedurende minimaal 2 uur. Dit dient op ontwerponttrekkingscapaciteit te gebeuren. Tijdens deze proef dient de stijghoogteverandering gemeten te worden in de bron en de bijbehorende peilbuis(zen). Tijdens de uitvoering van de capaciteitsproef in de laatste bron dient ook de stijghoogteverandering te worden gemeten in de andere bronnen.

3.4.2 Beoordelen bronnen

Normen

Zand

In de literatuur staan diverse normen voor sediment concentraties in onttrokken en te infiltreren grondwater. Het U.S. Environmental Protection Agency en the National Water Well Association stellen dat voor grondwater dat direct in contact komt met, of dat gebruikt wordt bij het produceren van, voedsel en dranken, de hoeveelheid sediment lager moet zijn dan 1 mg/l (Driscoll, pg. 527). Ervaringen met infiltratiebronnen in de US

geven aan dat te infiltreren grondwater met een zand-concentratie gelijk aan 1 mg/l bronnen kunnen verstopen en dat er goede ervaringen zijn met infiltratie bij een zandgehalte van 0,004 mg/l (Driscoll, pg. 769). Andere literatuur geeft aan dat om verstopping te voorkomen in uniforme zand-formatie de hoeveelheid sediment niet groter moet zijn dan 3 mg/l (Jones, pg. 137). Uit een door KIWA gemaakt internationaal literatuuroverzicht blijkt dat onttrekkingsbronnen minder dan 0,1-0,01 mg/l zand mogen bevatten (Kobus, pg. 20).

Slib en zwevende delen

Metingen bij diverse energieopslagprojecten (lit. 2 geven aan dat de MFI meestal tussen de 0,5 en 2 s/l² kan liggen. In sommige gevallen wordt een MFI van 3 à 4 s/l² aangetroffen.

Of alle metingen uitgevoerd door de diverse bedrijven met elkaar te vergelijken zijn, is sterk twijfelachtig omdat de MFI-metingen in de loop van de tijd aangepast is (bijvoorbeeld gebruik van gestandaardiseerde filtertjes).

Beoordelen bronnen

De omschrijving ten aanzien van het schoonverklaren is geconcretiseerd. De bron moet aan de volgende eisen voldoen:

- het vaste stof gehalte moet lager zijn dan 0,1 mg/l;
- het MFI-getal moet in principe lager zijn dan 2 s/l²;
- het uitvoeren van een capaciteitsproef, en het bepalen van het specifieke debiet na 2 uur pompen. De waarde moet gebaseerd worden op een te verwachten kD-waarde, spreidingslengte en een bron-efficiëntiefactor van minimaal 90%. Bij twijfel moet de boorfirma aantonen dat de lagere capaciteit geweten kan worden aan de bodemgesteldheid. Als de bovenstaande verlaging wordt overschreden en de aannemer van mening is, dat dit een gevolg is van een afwijkende bodemopbouw, dan dient de aannemer deze afwijking aan te tonen (bijvoorbeeld met een pompbeurt).

Richtlijn ontwikkelen bronnen

De bronnen dienen zodanig te worden schoongepompt en ontwikkeld dat ze geschikt zijn voor het langdurig onttrekken en infiltreren van grondwater op ontwerpcapaciteit.

De beoordeling van de bronnen dient te worden gebaseerd op het vaste stof gehalte, het MFI-getal en de resultaten van de capaciteitsproef.

3.5 Putbehuizingen

Algemeen

Putbehuizingen dienen ter bescherming van bronnen met toebehoren, waaronder leidingen met appendages (bestaande uit meet- en regelcomponenten) en ruimtevoorzieningen (zoals ventilatie, isolatie en verwarming). Een putbehuizing dient in principe eenvoudig toegankelijk te zijn voor metingen en klein onderhoud, en ook voor groot onderhoud (waaronder het verticaal kunnen trekken van bronpomp en leidingen).

Type

Putbehuizingen kunnen qua afwerking/type ten opzichte van maaiveld worden onderverdeeld in bovengronds, ondergronds en een tussenvorm, te weten gedeeltelijk bovengronds en voor het resterende gedeelte ondergronds.

Het type putbehuizing wordt bepaald door:

- technische randvoorwaarden;
- randvoorwaarden van derden, bijvoorbeeld wens opdrachtgever, architect of anderen met betrekking tot voorkeur of visualiteit.

In onderstaand tabel worden de drie bij energieopslag toe te passen type putbehuizingen weergegeven.

Type putbehuizing	Bovengronds	Ondergronds	Half bovengronds
Voordelen	Geen waterdichte bodem nodig	Niet in het zicht	Minder in het zicht
	Geen bouwput, geen bemaling	Minder afhankelijk van terrein: mogelijk op gemeentegrond (trottoir, in de weg)	In principe geen waterdichte bodem nodig
	Goede toegankelijkheid		Goede toegankelijkheid
	Eenvoudige ventilatievoorziening		Eenvoudige ventilatievoorziening
Nadelen	Duidelijk in het zicht, esthetisch aspect belangrijk (overleg opdrachtgever en/of architect)	Graven van bouwput, kans op bemaling	
	Groter bevroingsgevaar	Minder toegankelijk	
		Kans op vochtoverlast	
		Evt. fundering noodzakelijk bij verkeersbelasting	
Aandachtspunt	ARBO	ARBO	ARBO

Richtlijn putbehuizing

Het type putbehuizing wordt bepaald door technische randvoorwaarden en de wens van de opdrachtgever en derden. Belangrijke aandachtspunten hierbij zijn bijvoorbeeld toegankelijkheid, ARBO, waterdichtheid, esthetisch aspect en de kosten.

3.6 Overige uitvoeringszaken

3.6.1 Afvoer grond

In het Bouwstoffenbesluit staat aangegeven op welke wijze moet worden omgegaan met grond afkomstig uit boorgaten, bouwputten en sleuven.

Vrijkomende grond dient te worden verzameld in een depot of grondcontainer voor tijdelijk opslag. Voor bepaling van de afzetmogelijkheden dient de grond te worden bemonsterd en door een Sterlab te worden geanalyseerd op het zogenaamde NEN5740-pakket. Als uit onderzoek blijkt dat de grond verontreinigd is en niet kan worden afgezet als schone grond of categorie 1 bouwstof (zoals geformuleerd in het Bouwstoffenbesluit), dan dient in overleg te worden getreden met de opdrachtgever/directie. De eigenaar van het perceel is altijd de 'ontdoener' van de grond. Hij is verantwoordelijk voor de juiste afvoer van grond.

3.6.2 Lozen van grondwater

De bronnen dienen schoon en slibvrij grondwater te leveren. Hiervoor dienen de bronnen tijdens realisatie afzonderlijk te worden ontwikkeld.

Om de bronnen tijdens bedrijfsvoering goed te laten functioneren dienen de bronnen periodiek onderhouden te worden.

Een mogelijkheid is de bronnen periodiek en afzonderlijk te spuien.

Het vrijkomend grondwater tijdens de verschillende fasen dient te worden geloosd. Deze lozingen kunnen plaatsvinden op de riolering of op oppervlaktewater.

Indien vrijkomend grondwater op riool wordt geloosd, dan dient hiervoor toestemming te worden gevraagd bij de betreffende gemeente. Veelal dient een lozingsvergunning c.q. ontheffing te worden aangevraagd. Rekening dient te worden gehouden met een proceduretijd van een aantal weken.

Voor de lozing op open water dient toestemming te worden gevraagd bij het waterschap, hoogheemraadschap of provincie. In dit geval is meestal een WVO-vergunning vereist. De proceduretijd hiervoor bedraagt zes maanden.

Richtlijn overige uitvoeringszaken

Ten aanzien van de afvoer van uitkomende grond dient men volgens het Bouwstoffenbesluit te werk te gaan.

De eigenaar van het perceel is altijd de 'ontdoener' van de grond. Hij is verantwoordelijk voor de juiste afvoer van grond.

Voor het lozen van grondwater dient de lozingsmogelijkheden te worden bepaald. Bepaal of het water op riool of op oppervlaktewater kan worden geloosd. Hierbij dient te worden bepaald wat de benodigde vergunningen zijn.

4 Werktuigbouwkunde/elektrotechniek

In dit hoofdstuk wordt verder ingegaan op de werktuigbouwkundige en elektrotechnische installatie onderdelen van een grondwatersysteem. In paragraaf 4.1 wordt eerst ingegaan op de componenten en termen die bij een grondwatersysteem van toepassing zijn. Vervolgens wordt in paragraaf 4.2 ingegaan op verschillende configuraties van eenvoudige grondwatersystemen en de wijze waarop ze geregeld worden. In paragraaf 4.3 wordt tenslotte de materiaalselectie van de componenten in het grondwatersysteem behandeld.

4.1 Onderdelen grondwatersysteem

4.1.1 Algemeen

Grondwatercircuit (primair circuit)

Het grondwatercircuit bestaat uit de bronnen, het leidingwerk en de appendages die in hydraulische verbinding staan met het grondwater in het opslagpakket (zie figuur 4.1).

Gebouwcircuit (secundair circuit)

In relatie tot energieopslagsystemen kan het gebouwcircuit gedefinieerd worden als al het leidingwerk en appendages dat hydraulisch gezien geen deel uitmaakt van het grondwatercircuit maar thermisch wel van het totale energieopslagsysteem (zie figuur 4.1).

Ontgassingsdruk/minimum systeemdruk

De ontgassingsdruk is de druk waarbij het grondwater, bij de gegeven grondwatertemperatuur, gaat ontgassen. De minimum circuitdruk in het grondwatercircuit moet liggen boven de ontgassingsdruk. Is de ontgassingsdruk lager dan de atmosferische druk, dan wordt de atmosferische druk als minimum druk gehanteerd. De ontgassingsdrukken van grondwater in Nederland tot 200 m-mv liggen meestal tussen de 0 en de 200 kPa (overdruk ten opzichte van atmosferisch).

Richtlijn minimum systeemdruk

De ontgassingsdruk (bij de gegeven grondwatertemperaturen) is in principe de minimum circuitdruk, behalve wanneer de ontgassingsdruk beneden de atmosferische druk ligt. In dat geval is de atmosferische druk de minimum circuitdruk.

Drukhandhaving

Ontgassing van het grondwater kan onder andere verstopping van de bronnen en corrosie veroorzaken. Om dit te voorkomen zal het grondwatercircuit op een druk gehouden moeten worden die groter is dan de minimum circuitdruk. Toetreding van zuurstof, hetgeen o.a. ijzerneerslag kan veroorzaken, is daarmee ook uitgesloten. Bij ondiepe aquifers en hoge gasgehaltenes in het grondwater is het risico van bronverstopping door ontgassing groter.

Om het circuit op een voldoende grote overdruk te houden, kan er gebruik gemaakt worden van (regel)afsluiters, zelfregelende injectieventielen en/of injectieleidingen.

Richtlijn drukhandhaving

Er moeten voorzieningen worden getroffen om het gehele grondwatercircuit te allen tijde boven de minimum circuitdruk te houden.

4.1.2 Pompkamer

De pompkamer is het bovenste gedeelte van de stijgbuis en wordt meestal in kunststof uitgevoerd. Het biedt plaats aan de bronpomp, de pers- en injectieleiding en de meetbuis (zie figuur 4.2 en paragraaf 3.3.1). De pompkamer dient lucht- en waterdicht afgesloten te worden. De drukklasse van de pompkamer inclusief verbinding dient zodanig te zijn dat het bestand is tegen de drukken die optreden tijdens het ontwikkelen en onderhouden van de bronnen en tijdens de normale bedrijfsvoering.

Richtlijn pompkamer

De pompkamer moet bestand zijn tegen de drukken die optreden tijdens aanleg, beheer, onderhoud en bedrijfsvoering.

4.1.3 Bronpomp

Algemeen

De bronpomp draagt zorg voor het verplaatsen van het grondwater van de onttrekkingsbron naar de infiltratiebron.

Typen bronpompen

Er zijn drie typen pompen mogelijk: bovengrondse pompen, onderwaterpompen en deep shaft pompen. In Nederland wordt bij energieopslagsystemen vrijwel altijd een onderwaterpomp toegepast. De voordelen zijn:

- geen aanzuiging van water, zoals bij een bovengrondse pomp, dus minder risico op ontgassing en luchttoetreding;
- geen lange as, met potentiële problemen rond afdichtingen en lagers, zoals bij een deep shaft pomp;
- gemakkelijk verkrijgbaar;
- minder geluidsoverlast;
- betrouwbaar.

De nadelen zijn:

- de pomp moet smal zijn om in de pompkamer te passen. Hierdoor is het rendement van de pomp en de motor relatief laag en is frequentieregeling van de bronpomp kritisch (zie aldaar);
- onderhoud aan de pomp is lastig omdat de pomp zich diep in de bron bevindt.

Richtlijn type bronpomp

Het is niet gangbaar om bovengrondse pompen toe te passen die het grondwater aanzuigen (in verband met ontgassing of beluchting). De voorkeur is om onderwaterpompen toe te passen.

Dimensionering bronpomp

Maximaal debiet

De bronpomp moet uiteraard het maximaal gevraagde debiet kunnen leveren bij de verwachte opvoerhoogte. De maximaal te verwachten opvoerhoogte wordt met name bepaald door de bron, het verbindend leidingwerk tussen de bronnen en alle componenten die zich daarin bevinden. De onttrekkings- en injectiedruk in de bronnen kunnen soms belangrijk zijn maar zijn in de meeste Nederlandse omstandigheden (goed doorlatende aquifers) relatief gering. Aangezien de exacte wijze van realisatie van het leidingwerk vaak niet bekend is tijdens de dimensionering van de bronpomp, kan het verstandig zijn enige overdimensionering toe te passen; dit geeft ruimte voor een aantal extra bochten et cetera. Ook kan het verstandig zijn rekening te houden met het feit dat de bronnen en de warmtewisselaar(s) in de loop der tijd eventueel gaan verstopten. Indien men daar geen rekening mee houdt zal het debiet terug lopen bij bronverstopping.

Minimaal debiet

Op grond van het verwachte minimaal gevraagde koel-/verwarmingsvermogen dient het minimaal benodigde debiet van het grondwatercircuit en de daarbij behorende opvoerhoogte te worden vastgesteld. De bronpomp dient dit minimale debiet ook te kunnen leveren. Hierbij moet rekening gehouden worden met het feit dat onderwaterpompen veelal niet geschikt zijn voor zeer lage frequenties. Indien het minimale debiet veel lager is dan het maximale debiet moet soms worden overgegaan tot een tweede, kleinere, pomp voor de lage debieten.

Richtlijn bronpomp selectie

Bij de selectie van de bronpomp moet de opvoerhoogte bij minimum en maximum debiet berekend worden.

De pomp moet bestand zijn tegen de grondwaterkwaliteit in het opslagpakket (zie bij materiaal selectie paragraaf 4.3).

Opvoerhoogte

De opvoerhoogte (H_{man}) van een bronpomp bestaat uit een statische opvoerhoogte (H_s) en een weerstandshoogte (H_w). Er geldt:

$$H_{\text{man}} = H_s + H_w \text{ (in Pa)}$$

Statische opvoerhoogte (H_s)

De statische opvoerhoogte in een grondwatercircuit is gelijk aan de hoogte van de waterkolom tussen het grondwaterniveau in de onttrekkingsbron en het niveau in de infiltratiebron.

De statische opvoerhoogte neemt toe bij verhoging van het debiet omdat in die situatie het grondwaterniveau daalt in de onttrekkingsbron en stijgt in de infiltratiebron.

Weerstandshoogte (H_w)

Elke appendage (warmtewisselaar, vlinderkleppen, terugslagkleppen... et cetera) heeft een karakteristiek, debiet-afhankelijk drukverlies (K_v -waarde: debiet bij een drukval van 100 kPa bij een gegeven temperatuur). Dit drukverlies is op te vragen bij de leverancier. Voor de drukverliezen in het leidingwerk geldt het volgende:

$$\Delta p = \zeta * v^2 / 2 * \rho$$

Δp : drukverlies [Pa]
 ζ : weerstandscoefficiënt [-]
 v : mediumsnelheid [m/s]
 ρ : dichtheid [kg/m³]

Voor elk type leidingdeel (bochten, T-stukken, rechte leidingen, knie-stukken, verwijdingen en vernauwingen, etc.) is een weerstandscoefficiënt (ζ) te berekenen. Aan de hand van die coëfficiënten is het drukverlies per leidingdeel te berekenen.

De optelsom van alle drukverliezen (leidingen en appendages) vormt de totale weerstandshoogte H_w .

Systeemdruk

Door de drukverliezen en de statische hoogteverschillen bij elkaar op te tellen, kan op elk punt in het grondwatercircuit de druk berekend worden. Dit is belangrijk om te kunnen bepalen of de druk op elk punt groter is dan de ontgassingsdruk.

Richtlijn drukverliesberekening

Bij het ontwerp van het grondwatercircuit moet berekend worden op welk punt de laagste druk heerst. Bij het dimensioneren moet gezorgd worden dat de druk op dit punt hoger is dan de minimum circuitdruk.

Asvermogen/elektrisch vermogen

Wanneer de maximale opvoerhoogte bekend is, kan het asvermogen van de pomp berekend worden:

$$p_{as} = (q * H_{man}) / \eta_p$$

p_{as} : asvermogen [W]
 q : debiet [m³/s]
 H_{man} : maximale (manometrische) opvoerhoogte [Pa]
 η_p : rendement van de pomp [-]

Met behulp van het elektrisch rendement kan dan vervolgens het elektrisch vermogen berekend worden:

$$p_e = p_{as} / \eta_e$$

p_e : elektrisch motorvermogen [W]
 η_e : rendement van de elektromotor [-]

Frequentieregeling

In principe zou het debiet geregeld kunnen worden met behulp van een smoorklep terwijl de pomp steeds volledig aangestuurd wordt. Dit heeft als nadeel dat er grote elektrische energieverliezen in de pompaandrijving optreden en bovendien kan smoring makkelijk tot ontgassing leiden.

Voor het variëren van het debiet wordt daarom doorgaans een frequentieregelaar gebruikt.

Bij het starten van de pomp dient gezorgd te worden voor een opstartfrequentie die binnen enkele seconden aan de pomp aangeboden wordt. Wanneer de pompmotor van stilstand in bedrijf komt moet er zo snel mogelijk een filmpje van water ontstaan ter smering van de lagers van de rotor e.d. Bij een te lage frequentie of te lange aanlooptijd kan de pomp beschadigen.

Ter voorkoming van netvervuiling en ongewenste emissie in de motor leidingen worden in de praktijk vaak netontstoorfilters (aan de ingang van de frequentieregelaar) en sinus/LC-filters (aan de uitgang) van de regelaar geplaatst.

Richtlijn frequentieregeling

De aanlooptijd, de minimum en maximum frequentie en de startfrequentie van een bronpomp, incl. overige parameters moeten in de frequentieregelaar ingesteld worden conform de eisen van de pompleverancier.

Elektrische aansluiting bronpomp

Voor de elektrische voeding van de bronpomp moet in de pompkamer gebruik gemaakt worden van onderwaterkabel en in de grond van grondkabel. Beveiligingen voor kortsluiting en indirecte aanraking dienen gedimensioneerd te worden voor de betreffende kabel en in een regelschakelkast te zijn ondergebracht. Bepaling van de diameter van de kabels, de benodigde beveiligingen en alle overige elektrotechnische zaken moeten conform de NEN 1010 uitgevoerd worden.

De overgang van grondkabel naar onderwaterkabel kan plaatsvinden in de werkschakelaar of een schakelkastje. Het gebruik van een kabelmof heeft als nadeel dat tijdens onderhoudswerkzaamheden niet gecontroleerd kan worden of de pomp werkelijk spanningsloos is. Een voordeel is dat een kabelmof absoluut waterdicht is.

Richtlijn elektrische randvoorwaarden bronpomp

In de pompkamer moet onderwaterkabel worden toegepast. Voor elke pomp moet (in de nabijheid van de pomp) een werkschakelaar worden toegepast. Kabeldiameters en benodigde elektrische beveiligingen dienen conform de NEN 1010 te worden uitgevoerd.

Checklist keuze bronpomp

- Bestand tegen de lokale grondwaterkwaliteit.
- Moet voldoen aan de gestelde werkpunten (minimum en maximum debiet en de bijbehorende opvoerhoogtes)
- De nuldruk van de pomp moet minimaal zo hoog zijn dat het volledige grondwatercircuit op de minimum circuitdruk gebracht kan worden.
- Koeling van de pomp gegarandeerd door voldoende grondwaterstroming langs de pompmotor.
- Waterkolom boven de pomp ten alle tijden groter dan door de leverancier aangegeven minimum.
- Waterkolom boven de pomp te allen tijde groter dan de waterkolom van de minimale ontgassingsdruk.
- Geschikt voor frequentiebedrijf, continu gebruik bij onderwatertoepassing en permanent verblijf onder water.
- Inbouwen en inregelen conform inbouw-, aansluit- en onderhoudsvoorschriften.

4.1.4 Persleiding

De persleiding legt een hydraulische en mechanische verbinding tussen de bronpomp en de bronkop (zie figuur 4.2). De diameter van de leiding wordt bepaald door de keuze van de bronpomp, de maximaal toelaatbare stroomsnelheid en het drukverlies. Bij het bepalen van de lengte van de persleiding (pompdiepte) dient rekening gehouden te worden met de verlaging die als gevolg van onttrekking met het maximum debiet op kan treden.

Door middel van het leidingwerk in de putbehuizing wordt een verbinding gemaakt met de transportleiding. De persleiding moet in de bronpomp, in de pompkamer of in de putbehuizing voorzien zijn van een terugslagklep zodat bij uitschakeling van de pomp het circuit op druk blijft.

4.1.5 Injectievoorziening

Een injectieleiding is bedoeld om het grondwater in de bron te infiltreren (zie figuur 4.2). De injectieleiding wordt via de bronkop en het leidingwerk in de putbehuizing verbonden met de transportleiding. De afstand tussen de uitstroom van de injectieleiding en de laagste grondwaterstand van het opslagpakket dient in alle gevallen groter te zijn dan de waterkolom behorende bij de ontgassingsdruk.

Bij toepassing van een ondergrondse zelfregelend injectieventiel in de pompkamer wordt dit ventiel aan de injectieleiding bevestigd.

Richtlijn injectievoorziening

*De afstand tussen de uitstroom van de injectieleiding en de laagste grondwaterstand van het opslagpakket dient in alle gevallen groter te zijn dan de waterkolom behorende bij de ontgassingsdruk.
Het is ook mogelijk gebruik te maken van een gecombineerde pers- en injectieleiding*

Checklist keuze injectieventiel

- Bestand tegen de lokale grondwaterkwaliteit.
- Moet voldoen aan de gestelde werkpunten (minimum en maximum debiet en de bijbehorende drukken).
- Waterkolom boven het ventiel te allen tijde groter dan de waterkolom van de minimale ontgassingsdruk.
- Geschikt als regelventiel en afdichtingsventiel.
- Inbouwen en inregelen conform inbouw-, aansluit- en onderhoudsvoorschriften.

4.1.6 Bronplaat/bronkop

Aan de bronplaat worden de onderdelen in de pompkamer bevestigd. De bronplaat is de deksel van de pompkamer en moet voor een lucht- en waterdichte afsluiting zorgen. Op die manier kan er geen zuurstof toetreden in de pompkamer of water uittreden. Verder moet de bronplaat ten minste bestemd zijn tegen de maximale.

De bronplaat vormt samen met het leidingwerk direct erboven de bronkop (zie figuur 4.2).

Richtlijn bronplaat

*Met behulp van een bronplaat dient een pompkamer lucht- en waterdicht afgesloten te worden. De bronplaat dient de maximale drukken in de pompkamer te kunnen weerstaan.
De bronplaat moet ten minste van 1 peilopening zijn voorzien.*

4.1.7 Leidingwerk en appendages in de putbehuizing

Het leidingwerk in de putbehuizing vormt de verbinding tussen de bron en de transportleiding. In de praktijk wordt vaak gebruik gemaakt van één enkele transportleiding naar de bron die zowel gebruikt wordt voor het afvoeren van opgepompt grondwater naar de warmtewisselaar als voor het aanvoeren van het te infiltreren grondwater.

Om onderhoudswerkzaamheden goed te kunnen uitvoeren is het van belang dat het leidingwerk in de pompkamer eenvoudig van het leidingwerk in de putbehuizing los te maken is en uit de bron getrokken kan worden. Wanneer de hoogste natuurlijke stijghoogte die in het opslagpakket voorkomt, boven de bronplaat uitkomt, geeft dit problemen bij aanleg én bij eventuele onderhoudswerkzaamheden. De voorkeur heeft het dan ook, om de bronplaat boven deze waterstand te plaatsen.

Wanneer de putbehuizing droog moet blijven dient gelet te worden op de hoogst voorkomende freatische grondwaterstand. Is deze waterstand hoger dan de bodem van de put dan dienen de doorvoeren voor de pompkamer en eventuele overige doorvoeren waterdicht te worden uitgevoerd.

Het grondwater in het leidingwerk dient te allen tijde vorstvrij te blijven.

Een putbehuizing kan, elektrotechnisch beschouwd, gezien worden als een nauwe geleidende ruimte. Voor het aansluiten van vast of verplaatsbaar elektrisch materieel dient daarom voldaan te worden aan hetgeen de NEN1010 hieromtrent voorschrijft. Slecht toegankelijke putbehuizingen dienen voorzien te zijn van een noodschakelaar die het gehele grondwatersysteem kan uitschakelen.

Richtlijn leidingwerk putbehuizing

*Het grondwater in het leidingwerk van de putbehuizing dient te allen tijde vorst vrij te blijven.
De putbehuizing dient zo te zijn ingericht dat al het leidingwerk in de pompkamer getrokken kan worden.
Wanneer een putbehuizing slecht toegankelijk is moet er een noodschakelaar aanwezig zijn.*

4.1.8 Leidingwerk in het terrein

Materiaal

Voor het leidingwerk in het terrein wordt in de praktijk veelal gebruik gemaakt van kunststof leidingen (PVC of PE). Zie voor materiaalselectie paragraaf 4.3.

In het vervolg van deze paragraaf wordt uitgegaan van kunststof leidingwerk.

Stroomsnelheid

Laminaire stroming komt in transportleidingen van grondwatersystemen niet voor aangezien de stroomsnelheid dan onacceptabel laag moet zijn. In de transportleidingen heerst dus altijd een turbulente stroming.

De voor- en nadelen van een te hoge stroomsnelheid staan hieronder opgesomd.

Voordelen hoge stroomsnelheid:

- eventuele vervuiling in het grondwater kan niet neerslaan in de leidingen;
- warmte of koude is snel beschikbaar bij de warmtewisselaar;
- een kleine leiding diameter vraagt een geringere investering.

Nadelen hoge stroomsnelheid:

- het drukverlies in de leidingen en appendages neemt kwadratisch toe met de stroomsnelheid hetgeen energetisch ongunstig is;
- de kans op cavitatie (dampbellen die *imploderen*) wordt vergroot door een hoge stroomsnelheid, een hoge concentratie aan gassen in het water, door grote drukvallen over appendages of scherpe hoeken in het hydraulisch systeem.

Als vuistregel kan worden aangehouden dat een stroomsnelheid van 1,5 - 2,5 m/s voldoet. Bij plaatselijke vernauwingen of grote rechte leidingen kan eventueel een iets hogere stroomsnelheid toegepast worden.

Overige zaken

Bij transportleidingen die in de grond liggen moet gezorgd worden voor voldoende gronddekking (minimaal 0,8 m) zodat het water in de winter niet kan bevriezen. Bij weg-onderdoorgangen is de mechanische belasting van het leidingwerk een aandachtspunt.

Krachten, die door (zwaar) verkeer op de transportleidingen worden uitgeoefend, kunnen opgevangen worden door, ter plaatse van de onderdoorgang, over te gaan op een stalen leiding of door de transportleiding in een stalen mantelbuis te leggen of door het leidingwerk dieper te leggen.

Met name bij bochten en T/Y-stukken dient gebruik gemaakt te worden van trekvaste verbindingen.

Het aantal hoogteverspringingen en bochten dient geminimaliseerd te worden om geen onnodige leidingweerstand te introduceren.

Richtlijn kunststof transportleidingen in het terrein

Met name bij bochten en T/Y-stukken dient gebruik gemaakt te worden van trekvaste verbindingen.

Transportleidingen in het terrein dienen altijd vorstvrij gehouden te worden, de minimale gronddekking bedraagt 0,8 m.

De transportleidingen dienen beschermd te worden tegen mechanische belasting van buitenaf.

Het aantal bochten en hoogteverspringingen dient geminimaliseerd te worden.

Vervuiling van het leidingwerk dient tijdens realisatie zoveel mogelijk voorkomen te worden.

4.1.9 Techniekrimte

Ruimte

De ruimte waar de warmtewisselaar staat en de overige componenten die te maken hebben met de uitwisseling van warmte en koude tussen het grondwatercircuit en het gebouwcircuit, wordt de techniekrimte genoemd. Het heeft de voorkeur gebruik te maken van een ruimte die zo laag mogelijk t.o.v maaiveld is. Bij voorkeur in de kelder of de begane grond.

Warmtewisselaar (Tegen Stroom Apparaat = TSA)

De warmtewisselaar zorgt voor de uitwisseling van koude en warmte tussen het grondwatercircuit en het gebouwcircuit. Aangezien in energieopslagsystemen gewerkt wordt met relatief lage temperaturen en kleine temperatuurverschillen, is de platenwarmtewisselaar als warmtewisselaarconcept het meest geschikt. De voordelen van een platenwarmte-wisselaar zijn:

- de flexibiliteit , grote capaciteitsrange binnen een standaard frame en diverse grootte in frames;
- de goede warmteoverdracht (zeer dun plaat materiaal);
- een groot zelf reinigend vermogen.

De drukval over de wisselaar ligt in de praktijk tussen 20 en 100 kPa. Deze waarde kan aan de leverancier opgegeven worden.

Naast de drukval kenmerken de volgende getallen een warmtewisselaar: het logaritmisches temperatuurverschil, in- en uitgaande temperaturen en het vermogen. Het logaritmisches temperatuurverschil en het vermogen is te berekenen met de volgende formules:

$$\Delta T_{\ln} = (\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) / \ln(\Delta T_{\max} / \Delta T_{\min})$$

ΔT_{\ln} : logaritmisches temperatuurverschil [K]

ΔT_{\max} : verschil tussen de ingaande watertemperatuur gebouwszijde en de uitgaande watertemperatuur grondwaterzijde [K]

ΔT_{\min} : verschil tussen de ingaande watertemperatuur grondwaterzijde en de uitgaande watertemperatuur gebouwszijde [K]

$$P = q \cdot \Delta T \cdot 1,16$$

P: vermogen [kW]

q: debiet [m³/h]

ΔT : temperatuur verschil tussen het ingaande en uitgaande water grondwaterzijde [K]

Checklist keuze warmtewisselaar

- Bestand tegen het medium in het gebouwcircuit.
- Bestand tegen de lokale grondwater kwaliteit.
- Qua gewicht en afmetingen plaatsbaar in de techniekrimte.
- Bestand tegen de maximale systeemdrukken (zowel gebouwcircuit als grondwatercircuit)
- Moet voldoen aan de gestelde werkpunten (temperatuurwaarden bij gegeven debieten, drukval en ΔT).
- Aan te sluiten op het leidingwerk / inpassing in de techniekrimte.

Expansievat

Om het drukverloop in het grondwatercircuit te egaliseren, wordt gebruik gemaakt van een expansievat. Bij kleine lekkages in bijvoorbeeld leidingen en appendages zorgt het expansievat dat de druk gehandhaafd blijft. Dit voorkomt dat de pomp voortdurend ingeschakeld moet worden om het systeem op druk te houden. Ook drukpieken die veroorzaakt worden als gevolg van het in- of uitschakelen van pompen of het open of dicht sturen van kleppen worden door het expansievat vereffend.

De delen van het expansievat die in aanraking komen met het grondwater, moeten daartegen bestand zijn.

Omkeerkleppen

De stromingsrichting in het grondwatercircuit wordt per seizoen gewisseld. In een gebouw wordt vaak gebruik gemaakt van slechts één stromingsrichting. Om toch te zorgen dat de warmtewisselaar voortdurend in tegenstroom staat zal er gezorgd moeten worden dat óf in het grondwatersysteem óf in het gebouwcircuit de stromingsrichting omgedraaid wordt. Dit kan doormiddel van een omkeersectie (een viertal kleppen die zorg draagt voor het omkeren van de stromingsrichting). Deze kleppen kunnen zowel in het gebouwcircuit als het grondwatercircuit worden opgenomen. In de meeste gevallen heeft plaatsing in het gebouwcircuit de voorkeur aangezien de eisen die aan de materiaalkwaliteit van de kleppen gesteld worden dan lager zijn (de omkeersectie kan gebouwzijdig dus goedkoper uitgevoerd worden dan grondwaterzijdig).

Inpandig leidingwerk

Bij binnenkomst van transportleidingen in het gebouw, moet gelet worden op de waterdichtheid van de muurdoorvoeren. Wanneer de hoogste freatisch grondwaterstand zich boven de muurdoorvoer bevindt zal in ieder geval gebruik gemaakt moeten worden van een waterdichte doorvoer. Wanneer, binnen het gebouw, verschillende tussenmuren doorboord moeten worden, kan er verlangd worden dat deze muurdoorvoeren brandwerend worden uitgevoerd. Dit wil zeggen dat er gebruik gemaakt dient te worden van doorvoerpluggen die, bij brand, in staat zijn de muurdoorgangen gedurende een bepaalde tijd dicht af te sluiten. Voor materiaalselectie van het inpandig leidingwerk, zie paragraaf 4.3.

4.1.10 Onderhoudsvoorziening

Onderhoud aan een grondwatersysteem kan op verschillende manieren geïmplementeerd worden. Veelal wordt het grondwatercircuit gespoeld of gespuid. Het doel van spoelen/spuien is het verwijderen van opgehoopt vuil uit de bronnen. Het spoelen/spuien kan gezien worden als periodiek onderhoud. Tijdens het spoelen wordt het grondwater uit een bron onttrokken en over een filter geleid. Het gefiltreerde water wordt vervolgens weer in een bron geïnfilteerd. Tijdens het spuien wordt het grondwater met een hoog debiet uit een bron onttrokken en geloosd op het riool, oppervlaktewater of naar een buffervat. Voor het lozen van grondwater is veelal een ontheffing noodzakelijk (zie paragraaf 3.6.2). Naast het reinigen van de bronnen heeft het spoelen/spuien ook als doel de transportleidingen en appendages in het grondwatercircuit schoon te maken. Een onderhoudsfilter wordt veelal in de techniekruimte opgesteld. Een aansluiting op een lozingspunt kan gemaakt worden vanuit de bronnen, de techniekruimte of ergens in de transportleidingen. De spoel/spuiprocedure kan zowel handmatig als automatisch plaats vinden.

Richtlijn onderhoudsvoorziening

In het grondwatercircuit moet een mogelijkheid zijn om periodiek/preventief onderhoud uit te voeren.

4.2 Regeling

4.2.1 Algemeen

Het grondwatersysteem kan geregeld worden op druk, temperatuur en debiet. Deze grootheden worden geregeld door het aansturen van een frequentieregelde bronpomp. Het variëren van het toerental en daarmee ook de temperatuur en druk en debiet. Een regelbare bronpomp heeft als voordeel ten opzichte van een vaste aansturing, dat het elektriciteitsverbruik daarmee wordt gereduceerd en de opgeslagen energiehoeveelheden niet meer aangesproken worden dan nodig is.

De regeling draagt zorg voor de communicatie tussen het grondwatersysteem en het gebouwstelsel. De communicatie bestaat uit, het inlezen van de elektrische opnemers, het regelen van de systeemgrootheden door het aansturen van de regelorganen, het uitvoeren van de beveiligingen en het registreren van relevante systeemvariabelen. Daarnaast draagt de regeling zorg voor het op druk houden van het grondwatercircuit wanneer er geen koude- of warmtevraag is.

4.2.2 Randvoorwaarden

Wij gaan er hier vanuit dat een vraag voor koude of warmte afkomstig is van een bovenliggend gebouwbeheersysteem (GBS). Voor het laden en ontladen van koude is het van belang dat er ontladen kan worden zodra er een vraag is vanuit de afnemers en dat er direct geladen wordt als dat mogelijk is.

4.2.3 Regelprincipes

Het doel van de regeling van een grondwatercircuit is het manipuleren van de te regelen grootheid (druk, temperatuur of debiet) op zo'n manier dat de waarde van de grootheid zo goed mogelijk voldoet aan de door de afnemer van koude of warmte gewenste waarde. In de onderstaande paragrafen staan steeds twee bronnen getekend, gescheiden door een transportleiding en een TSA. Voor de toepassing van een monobron geldt m.b.t. tot de regeling hetzelfde.

Eerst worden alle systeemvarianten beschreven, vervolgens volgt er een lijst met voor- en nadelen van de varianten.

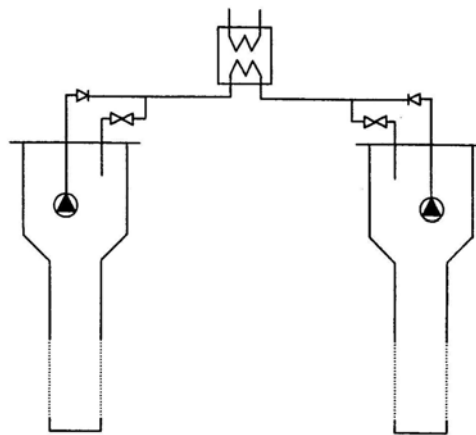
4.2.3.1 Vast debiet (aan/uit regeling)

Wanneer er een vast debiet gevraagd wordt, kan dit op een aantal manieren bereikt worden.

Pomp in combinatie met gedimensioneerde injectieleiding (figuur 4.3)

Wanneer een bronpomp volledig wordt aangestuurd, kan het debiet aangepast worden door de tegendruk die de pomp ontmoet (opvoerhoogte) te veranderen. Een

injectieleiding creëert samen met de weerstand in het grondwatercircuit en de weerstand in het opslagpakket een tegendruk. De injectieleiding moet qua diameter en lengte zo gedimensioneerd worden dat het gewenste debiet gehaald wordt, rekening houdend met de overige weerstand in het grondwatercircuit en met de randvoorwaarde dat het hele circuit op een druk moet staan die hoger is dan de minimum circuitdruk. Wanneer het systeem in rust is zal de injectieleiding achter de afsluiter, in de pompkamer, drukloos zijn, dat is een nadeel.



Figuur 4.3 Bronpomp in combinatie met injectieleiding

4.2.3.2 Variërend debiet

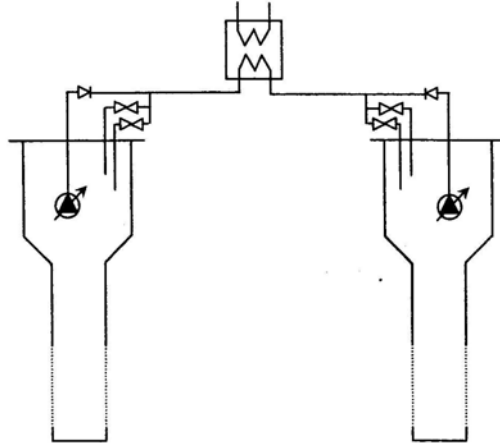
Wanneer er een variabel debiet gevraagd wordt kan dit op een aantal manieren bereikt worden.

Regelbare bronpomp met gedimensioneerde injectieleidingen (stappenregeling (figuur 4.4))

Injectieleidingen genereren in combinatie met het grondwater in het opslagpakket een tegendruk in het grondwatercircuit. De grootte van de tegendruk die de pomp ontmoet wordt bepaald door het grondwater in het opslagpakket, het bronontwerp, de weerstand in het grondwatercircuit, de diameter van de injectieleiding en de lengte van de injectieleiding. Wanneer het debiet met behulp van een frequentieregelaar verhoogd wordt, zal de voordruk bij de injectieleiding groter worden. Dit is energetisch minder gunstig omdat de pomp nu tegen een grotere voordruk moet pompen dan eigenlijk nodig is gezien de minimale systeemdruk. Om die reden kan de totale gewenste debietrange in stappen verdeeld worden. Voor elke debietstap moet er dan een injectieleiding of een combinatie van injectieleidingen gedimensioneerd worden zodat de druk, bij elk debiet min of meer constant blijft. Het systeem van figuur 4.4 kan met twee injectieleidingen op

3 verschillende debietstappen draaien. Eventueel kan in iedere stap het debiet enigszins gevarieerd worden.

Een nadeel is wanneer het systeem in rust is zal de injectieleiding achter de afsluiter, in de pompkamer, drukloos zijn.



Figuur 4.4 Regelbare bronpomp in combinatie met injectieleidingen

Regelbare bronpomp en drukhandhaving met een zelfregelend injectieventiel in de putbehuizing (figuur 4.5)

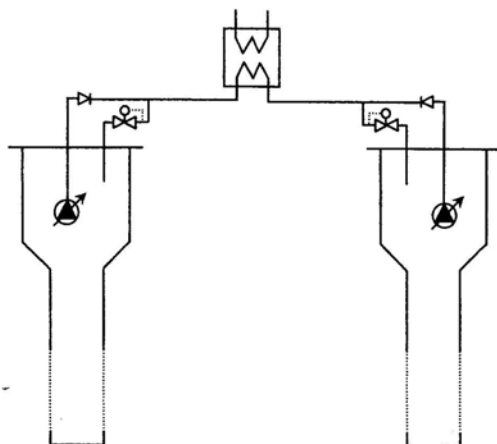
Een zelfregelend injectieventiel houdt de druk voor het ventiel op een constante (instelbare) waarde, bij een debiet dat varieert binnen het regelbereik van het ventiel. De pomp draagt zorg voor het regelen van het gewenste debiet, terwijl het ventiel het grondwatercircuit (voor het ventiel) op overdruk houdt.

De praktijk geeft aan dat de maximale drukval over een zelfregelend injectieventiel in dit concept beperkt is. De hoogte van de drukval wordt bepaald door de voordruk van het ventiel en de laagste natuurlijke grondwaterstand in het opslagpakket.

Wanneer de drukval in dit concept te hoog wordt kan er beter gekozen worden voor een zelfregelend ventiel in de pompkamer.

Een nadeel is wanneer het systeem in rust is zal de injectieleiding achter de afsluiter, in de pompkamer, drukloos zijn.

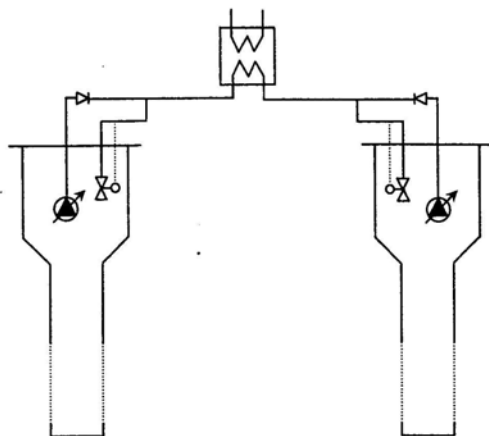
Het grote voordeel van dit concept is dat de klep eenvoudig bereikbaar is voor onderhoud.



Figuur 4.5 Regelbare bronpomp met zelfregelend injectieventiel in de putbehuizing

Regelbare bronpomp en drukhandhaving met een zelfregelend injectieventiel in de pompkamer (figuur 4.6)

Het principe is gelijk aan de variant met het ventiel in de putbehuizing, met dit verschil dat ook de injectieleiding in de pompkamer op overdruk gehouden wordt (zowel in rust als tijdens bedrijf). Gecombineerd gebruik van pers- en injectieleiding is mogelijk.



Figuur 4.6 Regelbare bronpomp met zelfregelend injectieventiel in de pompkamer

Samenvatting

Variant	Voordeel	Nadeel
Vast debiet		
<i>Gedimensioneerd injectieleiding + klep in de putbehuizing (figuur 4.3)</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> - Relatief goedkoop - Eenvoudig - Weinig storing gevoelige onderdelen 	<ul style="list-style-type: none"> - Debiet afwijkingen bij verstopping - Ontgassing in de injectieleiding tijdens rust - Bij lage grondwaterstanden kans op vacuüm situaties en daardoor leidingslag bij het opstarten
Variabel debiet		
<i>Stappen regeling met gedimensioneerde injectieleidingen (figuur 4.4)</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> - Geen debiet afwijking bij verstopping en natuurlijke stijghoogte veranderingen - Goede debietverdeling bij toepassing van meer dan een injectiebron 	<ul style="list-style-type: none"> - Ontgassing in de injectieleiding tijdens rust - Bij lage grondwaterstanden kans op vacuüm situaties en daardoor leidingslag bij het opstarten - Regeltechnisch complexer bij veel injectieleidingen - Koude of warmte aanbod af te stemmen op de vraag vanuit het gebouw
<i>Continu regeling met gedimensioneerde injectieleidingen (figuur 4.4)</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> - Geen debiet afwijking bij verstopping en natuurlijke stijghoogte veranderingen - Koude of warmte aanbod af te stemmen op de vraag vanuit het gebouw - Goede debietverdeling bij toepassing van meer dan een injectiebron 	<ul style="list-style-type: none"> - Drukverhoging voor de injectieleiding tijdens debiet verhoging in een stap - Meer drukschommelingen bij het overschakelen tussen de stappen - Ontgassing in de injectieleiding tijdens rust - Bij lage grondwaterstanden kans op vacuüm situaties en daardoor leidingslag bij het opstarten - * Regeltechnisch ingewikkeld
<i>Continu regeling met een zelfregelend injectieventiel in de putbehuizing (figuur 4.5)</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> - Traploze debietregeling met een na genoeg constante druk voor het injectieventiel - Regeltechnisch eenvoudig - Geen debiet afwijking bij verstopping en natuurlijke stijghoogte veranderingen - Koude of warmte aanbod exact af te stemmen op de vraag vanuit het gebouw - Goed bereikbaar voor onderhoud 	<ul style="list-style-type: none"> - Ontgassing in de injectieleiding tijdens rust - Bij lage grondwaterstanden kans op vacuüm situaties en daardoor leidingslag bij het opstarten
<i>Continu regeling met een zelfregelend injectieventiel in de pompkamer (figuur 4.6)</i>		

Variant	Voordeel	Nadeel
	<ul style="list-style-type: none"> - Traploze debietregeling met een na genoeg constante druk voor het injectieventiel - Regeltechnisch eenvoudig - Geen debiet afwijking bij verstopping en natuurlijke stijghoogte veranderingen - Koude of warmte aanbod exact af te stemmen op de vraag vanuit het gebouw - Geen ontgassing in de injectieleiding tijdens bedrijf en rust - Groot toepassingsgebied, ook toe te passen bij lage grondwaterstanden 	<ul style="list-style-type: none"> - Injectieventiel moeilijk bereikbaar voor onderhoud

Tabel 4.2 Voor- en nadelen van de regelprincipes

4.2.4 Regelgrootheden

In het grondwatercircuit kan op verschillende grootheden geregeld worden: debiet, druk en temperatuur. Deze grootheden worden geregeld met behulp van een frequentiegergelde bronpomp.

Debietregeling

Het regelen van het debiet van het grondwater op basis van een debietvraag vanuit de gebruiker.

Drukregeling

Het in stand houden van een bepaalde druk in het grondwatercircuit door middel van een bronpomp. Dit principe kan gebruikt worden als het afnemen van koude of warmte vanuit het gebouw circuit zich manifesteert in een drukverlaging.

Temperatuurregeling

Het regelen van de infiltratietemperatuur op basis van een gewenste temperatuur. Aangezien de warmte- of koudeoverdracht in de warmtewisselaar afhankelijk is van de stroomsnelheid door de wisselaar, kan de infiltratietemperatuur met behulp van de bronpomp geregeld worden.

4.2.5 Regelprocedures

Er moeten in de regeling ten minst procedures opgenomen zijn die het mogelijk maken om warmte en koude te laden en/of te ontladen en die het grondwatercircuit op druk kan houden ook wanneer het grondwatercircuit niet in bedrijf is.

Op die manier is uitgesloten dat, bij het inbedrijf komen van het grondwatersysteem na een periode van stilstand, ontgast of belucht water geïnfiltreerd wordt. Voor het uitvoeren van preventief onderhoud, kan voorzien worden in een automatische spoel of spui-procedure.

Richtlijn regelprocedures

Procedures voor laden en/of ontladen van warmte en/of koude en drukhandhaving tijdens rust moeten in ieder geval in de regeling zijn opgenomen.

De procedures moeten functioneren tijdens normale bedrijfsvoering, onderhoud en monitoring.

De regelgrootheid van het grondwatersysteem moet afgestemd zijn op het gebouwstelsel.

4.2.6 Beveiligingen

Niveau en drukbeveiliging

De belangrijkste beveiligingen die in ieder geval in een grondwatercircuit aanwezig moeten zijn, is een beveiliging op bronniveau (o.a. ter voorkoming van openbarsting van de bron) en een beveiliging op druk (o.a. minimale druk ter voorkoming van ontgassing).

Verder kunnen de onderstaande beveiligingen van belang zijn:

Overige beveiligingen

Drukverschil met gebouwstelsel

Een beveiliging op het drukverschil tussen het grondwatercircuit en het gebouwstelsel kan vooral van belang zijn als absoluut moet zijn uitgesloten dat de waterstromen van gebouw- en grondwatercircuit zich gaan vermengen (bijvoorbeeld lekkage van stoffen uit het gebouwstelsel naar het grondwatercircuit).

Maximum circuitdruk

Ter bescherming van de leidingen en appendages in het grondwatercircuit kan het verstandig zijn om te bewaken op maximum circuitdruk. Vooral wanneer de pomp een hogere nuldruk heeft dan de drukklasse van leidingen of appendages.

Flowbeveiliging

Aangezien een onderwaterpomp gekoeld wordt door het debiet die hij verplaatst is het veilig om een beveiliging te laten aanspreken op het moment dat de pomp wel draait maar er geen flow is. Deze beveiliging dient voorzien te zijn van een vertraging zodat het systeem wel op druk gebracht kan worden.

Lekdetectie

Wanneer lekkage absoluut moet zijn uitgesloten, kan een lekdetectie in ruimtes of bij leidingen voorzien worden. Wanneer het systeem in rust niet op druk blijft of zeer vaak op druk gebracht moet worden, kan dit gezien worden als lekkage en zal de beveiliging aanspreken.

Richtlijn beveiligingen

Er moeten ten minste de navolgende beveiligingen zijn ingebouwd t.b.v.:

- *bewaking van drukken;*
- *bewaking van (bron) waterniveaus;*
- *flowbeveiliging;*
- *drukhandhaving tijdens rust.*

Bij het aanspreken van een beveiliging moet voor de beheerder duidelijk zijn wat eventuele vervolg acties moeten zijn.

4.2.7 Registratie

De provinciale overheid kan in verband met de vergunningverlening een periodieke rapportage verlangen van bepaalde systeemvariabelen zoals energie hoeveelheden en onttrokken en geïnfilterde waterhoeveelheden. Deze waarden moeten daarom geregistreerd worden. Welke zaken geregistreerd moeten worden verschilt per provincie en staan aangegeven in de beschikking van de vergunning.

Daarnaast is het van belang om ook andere systeemvariabelen regelmatig op te slaan, zoals temperatuur, druk, niveau, debiet, bedrijfstoestanden en opgetreden storingen om zo achteraf inzicht te hebben in het functioneren van het opslagsysteem.

Richtlijn registratie

De in de vergunning aangegeven systeemvariabelen moeten geregistreerd worden.

Checklist regeling

Er moeten ten minste procedures aanwezig zijn voor koudelevering, warmtelevering en drukhandhaving tijdens rust.

Er moeten ten minste de navolgende beveiligingen zijn ingebouwd t.b.v.:

- bewaking van drukken;
- bewaking van (bron) waterniveaus;
- flowbeveiliging;
- drukhandhaving tijdens rust.

De waarden en grootheden die in de vergunning en/of overeenkomst met de opdrachtgever staan vermeld moeten worden geregistreerd en opgeslagen. Het betreft de registraties van ondermeer:

- circuitdrukken;
- waterniveaus;
- bedrijfsuren;
- bedrijfstoestanden;
- temperaturen;
- energiehoeveelheden;
- waterhoeveelheden.

4.3 Materiaalselectie

Bij de keuze van materialen moet rekening gehouden worden met een aantal factoren:

- grondwaterkwaliteit: bij de keuze van stalen leidingwerk is een belangrijk aandachtspunt het chloridegehalte in het grondwater. Bij chloridegehalten boven de 200 mg/l is RVS316 een voor de hand liggende keuze. Onder de 200 mg/l voldoet RVS304. In beide gevallen wordt uitgegaan van zuurstofloos water. Voor afdichtingen kan vaak gekozen worden tussen EPDM en NBR. Beide voldoen in principe;
- stoffen die van buiten af op het materiaal in kunnen werken (bijvoorbeeld vervuilde grond). Vooral het voorkomen van weekmakers in de grond kan schadelijk zijn voor de (kunststof) transportleidingen;
- in het geval van een warmtewisselaar moet ook gelet worden op de samenstelling van het medium in het gebouwcircuit;
- bij verbindingen tussen ongelijksoortige metalen moet rekening gehouden worden met het optreden van contactcorrosie. Wanneer dit gevaar bestaat is het potentiaalvrij uitvoeren een oplossing;
- voor de transportleiding wordt in pandig vaak gebruik gemaakt van RVS. Dit omdat RVS-leidingwerk compacter te maken is en omdat het de krachten, die ontstaan op de vele vaste punten in het in pandig leidingwerk, goed op kan vangen. Uitpandig wordt in de regel overgegaan op kunststof omdat dit goedkoper is.

Richtlijn materiaalkeuze

*Bij chloridegehalten in het grondwater van boven 200 mg/l kan ten minste RVS316 toegepast worden, daaronder kan RVS304 toegepast worden (uitgaande van zuurstofloos grondwater).
Verbindingen tussen ongelijksoortige metalen die in direct contact staan met grondwater moeten potentiaalvrij uitgevoerd worden.*

5 Literatuuroverzicht

- [1] Driscoll, F.G., 1989, Groundwater and wells, Johnson filtration systems inc., St. Pauls, Minnesota, US
- [2] IF Technology, 1997, Ontwerp en realisatie van bronnen, Arnhem
- [3] IF Technology, maart 2001 - Ontwerpnormen voor bronnen voor koude-/warmteopslag. Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Novem, projectnr. 149.508-105.0. Arnhem.
- [4] KIWA, 2000, Kennisdocument puttenvelden, Ontwerp, Aanleg en Exploitatie van pompputten, Nieuwegein
- [5] Kobus, E.J.M., Olsthoorn, T.N., Tuinzaad, H., Vogel, de, A.N.G., 1976, Omstorting van waterwinningsputten en het maximaal toelaatbare putdebiet, KIWA mededeling nr. 45, Nieuwegein
- [6] Olsthoorn, T.N., 1982, Verstopping van persputten, KIWA mededeling nr. 71, Rijswijk
- [7] Stolk, P., 1999 - Bodemtemperaturen in Nederland, figuren, tabellen en bijlagen. IF Technology, Arnhem.

Figuren

- 1.1 Principe van energieopslag
- 1.2 Principe van energieopslag/recirculatie
- 1.3 Principe van opslag/recirculatie

- 2.1 Geohydrologische doorsnede door Nederland
- 2.2 Berekende temperatuurveranderingen in het opslagpakket na 20 jaar

- 3.1 Bron opbarsting
- 3.2 Bron ontwerp

- 4.1 Principeschema grondwatersysteem
- 4.2 Pompkamer

Foto's

Foto's:

- 4.1 Persleiding met bronpomp
- 4.2 Bronkop
- 4.3 Het inbouwen van een pompkamer
- 4.4 Leidingwerk in de putbehuizing met meerdere injectieleidingen
- 4.5 Leidingwerk in de putbehuizing met een zelfregelend injectieventiel