

Kwaliteitsrichtlijn
Verticale Bodemwarmtewisselaars

Nederlandse

organisatie

voor

energie en

milieu



Kwaliteitsrichtlijn
Verticale Bodemwarmtewisselaars

COLOFON

Kwaliteitsrichtlijn Verticale Bodemwarmtewisselaars

Dit rapport is vervaardigd in het kader van het programma Warmtepompen

Beheer en coördinatie van dit programma berust bij¹:
Novem - Nederlandse organisatie voor energie en milieu
Swentiboldstraat 21
Postbus 17
6130 AA SITTARD
Telefoon: 046-4202202
Fax: 046-4528260
Contactpersoon: ir. R.M.H.J. Beuken

Novem geeft geen garantie voor de juistheid en/of volledigheid van gegevens, ontwerpen, constructies, producten of productiemethoden voorkomende of beschreven in dit rapport, noch voor de geschiktheid daarvan voor enige bijzondere toepassing.

Aan deze publicatie kunnen geen rechten worden ontleend.

Overname en publicatie uit dit rapport is toegestaan mits met bronvermelding.

Dit rapport is opgesteld door:
Groenholland BV
Valschermkade 26
1059 CD AMSTERDAM
Auteurs:
dr. H.J.L. Witte
drs. A.J. van Gelder

Opdrachtnummer: 0345-01-01-03-063 / 4700001435

Publicatienummer: 2DEN-03.24

Deze publicatie kan besteld worden via het Novem publicatiecentrum o.v.v. het publicatienummer.

Novem Publicatiecentrum
Postbus 1305
7301 BN APELDOORN
Fax: 055-5343864
E-mail: publicatiecentrum@novem.nl

Datum rapportage: mei 2003.

¹ Het programma Warmtepompen wordt uitgevoerd door Novem in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken

INHOUDSOPGAVE

1	INLEIDING	1
1.1	Afbakening.....	1
1.2	Projectkader.....	3
1.3	Inhoud	3
2	KADER	4
2.1	Systemen.....	4
2.2	De bodem.....	4
2.3	Bestaande normen	5
3	ONTWERP GESLOTEN VBWW	7
3.1	Achtergronden	7
3.2	Demarcatie systemen.....	9
3.3	Inventarisatie gegevens	9
3.3.1	Algemene locatieinformatie	9
3.3.2	Energieprofiel	9
3.3.3	Vermogen aan de bodem (bron).....	11
3.3.4	Bodemopbouw en thermische bodemeigenschappen	12
3.3.5	Geohydrologie	16
3.3.6	Grondwaterkwaliteit	17
3.3.7	Bodemwarmtewisselaar	17
3.3.8	Circulatiemedium.....	20
3.4	Ontwerpcriteria	21
3.5	Thermisch Ontwerp	22
3.5.1	Berekeningen	22
3.6	Hydraulisch ontwerp, pompkeuze.....	28
4	INSTALLATIE BODEMWARMTEWISSELAARS	31
4.1	Vorbereiding en coördinatie werkzaamheden.....	31
4.2	Constructie warmtewisselaar.....	32
4.2.1	Andere materialen	32
4.3	Inbrengtechniek.....	33
4.3.2	Vrijkomend materiaal, werkwater.....	34
4.3.3	Inbrengen warmtewisselaar.....	34
4.3.4	Afwerking boor- of sondeergat	34
4.4	Horizontaal aansluitwerk.....	35
4.4.1	Horizontale leidingen.....	36
4.4.2	Verbindingen	36
5	Testen en opleveren	37
5.1	Voorspoelen en afvullen	38
5.2	Dichtheidstest.....	39
5.3	Mechanische test.....	39
5.4	Oplevering.....	40
5.5	Administratieve aandachtspunten.....	40
5.6	Nazorg	40
	BIJLAGE I, DEELNEMERS WERKGROEP KWALITEIT	44
	BIJLAGE II, QUICK-SCAN: STAND VAN ZAKEN INTERNATIONAAL	45
	BIJLAGE III, MEDIUM EIGENSCHAPPEN	48
	BIJLAGE IV, OVERDRACHTSFORMULIEREN	52

1 INLEIDING

In de 'Derde Energienota 1996' [1] heeft het Ministerie van Economische Zaken de warmtepomp tot speerpunt verheven [2]. De warmtepomp wordt dan ook geacht een belangrijke bijdrage te leveren aan de te bereiken energiebesparing. Deze bedraagt in totaal 7 PJ in 2000 en 65 PJ in 2020. De bijdrage van de woningbouw daaraan bedraagt respectievelijk 0,2 en 16 PJ (equivalent met 1.000.000 wooneenheden). Voor de uitvoering van dit beleid is onder andere begin 1995 het programma 'Warmtepompen' gestart bij NOVEM². De doelstelling voor warmtepompen is een besparing van vier à vijf megaton CO₂ per jaar vanaf 2010 [3]. Op 13 april 2000 is het 'Convenant Warmtepomp Systemen' ondertekend door verschillende marktpartijen, de Minister van Economische Zaken en de staatsecretaris van VROM³. In het convenant [4] is vastgelegd met warmtepompen in de woningbouw een bijdrage aan de energievoorziening van 8 PJ te bereiken, hetgeen overeenkomt met 615.000 wooneenheden.

Door de NOVEM zijn binnen verschillende kaders studies geïnitieerd die tot doel hebben de kwaliteit van warmtepompsystemen te verbeteren en de marktintroductie te stimuleren ([5],[6],[7]). Binnen het warmtepompenconvenant heeft NOVEM, specifiek voor het toepassen van verticale bodemwarmtewisselaars (VBWW's), het project 'Kwaliteitsrichtlijn voor Verticale Bodemwarmtewisselaars' opgestart, waarbij dit rapport deel uitmaakt van de eerste fase. Vertegenwoordigers uit de werkgroep Kwaliteit (Bijlage I) vormden daarbij de klankbordgroep waarmee, op basis van individueel overleg en overleg tijdens enkele bijeenkomsten, deze ontwerprichtlijn is opgesteld.

Hoofdoel van het toepassen van warmtepompen voor verwarming (en mogelijk ook koeling) in de woningbouw is het gebruik van de ondergrond als *duurzame en hernieuwbare* (thermische) energiebron. Om werkelijk duurzaam te zijn moet een technologie aan verschillende voorwaarden voldoen, waaronder tenminste:

- Voorwaarden met betrekking tot de prestatie, want die is bepalend voor de behaalde besparingen en reductie van emissies gedurende het gebruik.
- Voorwaarden met betrekking tot de levensduur (50 jaar) van het systeem, want die bepaalt de duur dat het systeem kan functioneren en daarmee het te behalen milieurendement.
- Voorwaarden met betrekking tot het bereiken van een minimale belasting van het milieu tijdens gebruik van het systeem of gedurende het aanleggen daarvan.

De kwaliteitsrichtlijnen zijn erop gericht ervoor zorg te dragen dat aan deze eisen met betrekking tot de kwaliteit van een VBWW systeem wordt voldaan. Ook internationaal wordt het belang van kwaliteitsrichtlijnen op dit gebied steeds meer onderkend. Naast al bestaande nationale richtlijnen ([8],[9],[10]) zijn, in internationaal verband, door de IEA⁴ Annex 13 (waarin ook Nederland actief is) richtlijnen in voorbereiding.

1.1 Afbakening

Een warmtepomp is een systeem waarmee warmte (thermische energie) van een laag temperatuurniveau naar een hoog temperatuurniveau kan worden gebracht, vandaar de term *pomp*. Een warmtepomp kan omkeerbaar toegepast worden, d.w.z. met hetzelfde systeem kan een ruimte zowel verwarmd als gekoeld worden. Bij toepassing in de woningbouw in Nederland

² Nederlandse Organisatie voor Energie en Milieu

³ Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

⁴ International Energy Agency

wordt een warmtepomp, over het algemeen, alleen gebruikt voor verwarming en nog vrijwel niet voor actieve koeling. Het bodemwarmtewisselaarsysteem wordt wel voor directe (passieve) koeling gebruikt, zonder tussenkomst van de warmtepomp. In de utiliteitsbouw daarentegen, is de belangrijkste toepassing van de warmtepomp vaak juist de koeling (zowel actief als passief). De verwachting is dat in de toekomst mechanische koeling ook in de woningbouw een grotere rol gaat spelen. Naast de toepassing voor de klimaatregeling kan een elektrische warmtepomp overigens ook gebruikt worden voor de verwarming van tapwater.

Een warmtepomp “pompt” energie van een laag naar een hoog temperatuurniveau. Daarbij is zowel het hoge als het lage temperatuurniveau bruikbaar, namelijk voor verwarming of respectievelijk koeling. De bodem fungeert daarbij als warmte-bron (bij verwarming, de bodem wordt afgekoeld) of als koude-bron (gedurende koeling, de bodem wordt opgewarmd). Alhoewel er ook andere definities van “bron” mogelijk zijn (wanneer we b.v. energetisch redeneren) houden wij in dit rapport de bodem aan als de “bron”, de leverancier van zowel de gewenste warmte als koude. De door de warmtepomp opgewekte warmte of koude wordt door middel van een afgiftesysteem aan de woning of het gebouw afgegeven.

Deze ontwerprichtlijn beperkt zich tot **verticale bodemwarmtewisselaars** (VBWW), waarbij de warmte-uitwisseling met de bodem voornamelijk plaatsvindt door geleiding. Het VBWW systeem is een gesloten systeem van verticaal ingebrachte leidingen, waardoor een circulatiemedium wordt rondgepompt waarmee de thermische energie getransporteerd wordt.

De technologie wordt wereldwijd, in verschillende varianten, al tientallen jaren toegepast. De individuele componenten van het systeem, zoals constructie van de wisselaars en leidingen, de boor- of andere inbrengtechnieken, het aansluiten van horizontale leidingen en het lassen en druktesten van de leidingen, zijn allen bewezen technologieën. Dezelfde componenten en technologieën worden overigens niet alleen bij warmtepomp-projecten toegepast. De toegepaste PE (polyethyleen) en PVC (polyvinylchloride) buizen worden bijvoorbeeld al meer dan dertig jaar in de ondergrond gebruikt als water- en gasdrukleiding [11].

Voor het welslagen van een warmtepomp project is met name de **integratie** van de verschillende toegepaste technologieën en het vaststellen van een duidelijk **ontwerp-kader** belangrijk. Daarbij is het nodig om de verschillende fasen (voorstudie – ontwerp – uitvoering – oplevering – nazorg) van het proces, die vaak in de tijd gescheiden zijn en soms door verschillende bedrijven worden uitgevoerd, goed op elkaar af te stemmen. We moeten daarbij in gedachten houden dat, alhoewel de techniek breed wordt toegepast, de variatie in omstandigheden (bodemopbouw, geohydrologie, klimaat, bouwwijze en voorschriften) en randvoorwaarden zo groot is, dat bij grotere projecten altijd een specifiek ontwerp nodig is. Essentieel is de kwaliteit van het ontwerp en implementatie te laten overeenstemmen met de beoogde levensduur van meer dan 50 jaar.

Zoals reeds opgemerkt, worden verticale bodemwarmtewisselaars al langere tijd wereldwijd toegepast, van de noordelijke breedtegraden - waar de bodem s’inters bevroren wordt voor de noodzakelijke energieontrekking - tot in warme gebieden waar alleen gekoeld wordt. Het is dan ook niet verwonderlijk dat er een aanzienlijke hoeveelheid technisch en wetenschappelijk onderzoek aan deze systemen is verricht en er verschillende richtlijnen met betrekking tot kwaliteit bestaan. De Duitse VDI richtlijnen [8] vormen in Midden- en Noord-West Europa op dit moment daarvan de meest uitgewerkte variant. Daarnaast worden door de IEA Annex 13 ECES⁵) groep [12], waar ook Nederland deel van uitmaakt, internationale richtlijnen opgesteld.

Deze informatie, aangevuld met al bestaande Nederlandse richtlijnen zoals de NEN 7200 (voor het stuiklassen van PE leidingen) en de certificering [13],[14] van boorbedrijven en kabel/buizen leggers, vormt een solide basis voor het samenstellen van een richtlijn specifiek gericht op verticale bodemwarmtewisselaars.

⁵ Energy Conservation through Energy Storage

1.2 Projectkader

Het onderhavige project staat niet op zichzelf, maar vindt plaats binnen een kader van andere activiteiten. De al genoemde certificering van boorbedrijven (Bolegbo⁶) en kabelleggers (CKB⁷), bieden een belangrijk eerste aanknopingspunt.

Een beoordelingsrichtlijn (BRL) voor kleine verticale bodemwarmtewisselaars systemen, met als hoofdvoerende TNO⁸) en ISSO⁹), waarbij de resultaten van het dit rapport gebruikt worden, is in voorbereiding. De Nederlandse Vereniging voor Ondergrondse Energieopslag (NVOE) heeft een handboek gericht op gebruik van grondwater (open systemen) uitgebracht [7].

Het door Novem ondersteunde BEB¹⁰) project is bezig met een inventarisatie [5] van mogelijke milieu-aspecten bij aanleg en gebruik van ondergrondse energiesystemen, met als doel te komen tot beleidsaanbevelingen voor het voorkomen van negatieve milieu-effecten.

Bij het tot stand komen van de richtlijnen zelf kunnen verschillende fasen worden onderscheiden, van een eerste inventarisatie tot het uiteindelijke vastleggen in een wettelijk of beleidskader van relevante onderdelen (denk b.v. aan Wet bodembescherming). Het onderhavige project bevindt zich in fase 2 en 3: het vaststellen van de inhoud en vormgeven van de technische specificatie.

1.3 Inhoud

De ontwerprichtlijn wordt in verschillende onderdelen gesplitst, die globaal overeenkomen met de diverse fasen in een project: ontwerp, constructie en oplevering en nazorg.

In de ontwerprichtlijn zal een onderscheid gemaakt worden tussen eenvoudige (kleine) systemen die met behulp van standaard tabellen en grafieken ontworpen kunnen worden, en grotere systemen waarvoor een uitgebreider ontwerp nodig is.

⁶ Vereniging van boor-, kabelleg en buizenlegbedrijven

⁷ Certificatieregeling Kabelinfrastructuur en Buizenlegbedrijven

⁸ Nederlandse Organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek

⁹ Instituut voor studie en stimulering van onderzoek op het gebied van Gebouwinstallaties

¹⁰ Bodem als Energiebron en Buffer

2 KADER

2.1 Systemen

Een warmtepomp kan op verschillende manieren gebruik maken van de bodem als energiebron en –buffer, de volgende typen systemen kunnen worden onderscheiden:

- Open systemen waarbij grondwater wordt opgepompt en direct gebruikt voor verwarming of koeling. Over het algemeen wordt het opgepompte water, na te zijn opgewarmd of afgekoeld, weer teruggebracht in de bodem. Deze systemen bestaan in verschillende varianten, maar worden hier verder niet behandeld (zie bijvoorbeeld [6],[15] voor een overzicht).
- Semi-open systemen, waarbij water in een open of deels ge-cased boorgat wordt gecirculeerd ('standing column well').
- Horizontale bodemwarmtewisselaars. Hierbij worden leidingen op geringe diepte (circa 1 – 5 meter) horizontaal in de bodem gebracht, in rechte lijnen of als lussen ('Slinky'). De lussen kunnen verticaal of horizontaal georiënteerd zijn. In Scandinavië worden ook leidingen horizontaal ingedrukt tot diepten van circa 10 meter, waarbij een S-vormige warmtewisselaar wordt verkregen [16].
- Verticale bodemwarmtewisselaars. Hierbij worden leidingen tot grotere diepte (globaal tot 50 – 200 meter diepte) door middel van een druk- (maximaal 40 meter diepte) of boortechniek ingebracht.
- Energiepalen. Dit zijn (hei-)palen (of andere funderingselementen) voorzien van een warmtewisselaar.
- Directe expansie. Hierbij is de verdampert niet in de warmtepomp, maar direct in de bodem ingebracht.

Bij deze verschillende systemen kunnen dan nog allerlei varianten worden onderscheiden. Dit rapport beperkt zich tot: **verticale lage-temperatuur bodemwarmtewisselaars, ingebracht door middel van een boor- of druk (sondeer) techniek.**

Wel wordt aandacht besteed aan de horizontale leidingen die de verbindingen vormen van de verticale wisselaars naar de warmtepomp. De demarcatie van een VBWW systeem wordt gelegd bij de verdeler óf, wanneer geen verdeler wordt toegepast, bij de aansluiting op de warmtepomp.

2.2 De bodem

Het begrip "bodem" omvat zowel de grond als het grondwater. Boven de grondwaterspiegel is de bodem onverzadigd en bestaat deze hoofdzakelijk uit minerale delen en met lucht en vocht gevulde poriën. Beneden de grondwaterspiegel zijn de poriën compleet verzadigd met grondwater.

Begrippen als grind, zand, silt en klei betreffen het minerale deel van de bodem en zijn een maat voor de grofheid (textuur) en ook een indicatie voor het milieu waarin het materiaal oorspronkelijk is afgezet. Zo vind je grind en grof zand in gebieden waar afzetting heeft plaatsgevonden door snel stromende rivieren. Silt en klei zijn daarentegen in veel rustiger water of zelfs kustgebied gesedimenteerd. Veen is niet mineraal, maar vindt haar oorsprong in vegetatie die vaak later is afgedekt met zand of klei.

De bodem van Nederland bestaat tot op grote diepte in hoofdzaak uit door rivieren afgezet materiaal. Herkomst van het materiaal is afhankelijk van het herkomstgebied van de rivier, zo brengt in het zuiden van het land de Maas materialen uit de Ardennen en Noord-Frankrijk en in

het midden de Rijn uit de Alpen en het Duitse Middengebergte. Nabij de kust is het materiaal in het algemeen fijner (kleien) en langs de grote rivieren en bovenstrooms veel grover (zand, Maasgrind e.d.). Lokaal, zoals op de stuwwallen (midden en oost Nederland), de duinen of de dekzanden (oost en zuid Nederland), is materiaal door ijs of wind herbewerkt, verplaatst en opnieuw afgezet.

Het grondwater in de bodem vindt haar oorsprong in de neerslag of is, zoals in delen van het westen en noorden van Nederland, van mariene oorsprong. Van nature stroomt grondwater onder invloed van hoogteverschillen in het landschap, maar ook als gevolg van bemalingen in polders. In het algemeen is de grondwaterstromingssnelheid beperkt, echter in specifieke gevallen waar sprake is van een groot verhang en een behoorlijke doorlatendheid (grind en zand) kan de grondwaterstromingssnelheid sterk toenemen.

In de geologie wordt gesproken over formaties (o.a. Westland formatie, formatie van Kreftenheye, formatie van Breda). Indeling in formaties geeft veelal de herkomst of ontstaanswijze weer. In de geohydrologie wordt gesproken over watervoerende pakketten en scheidende lagen. De watervoerende pakketten zijn (grof)zandig, goed waterdoorlatend en dienen als bron voor waterwinning. De scheidende lagen zijn kleiig of slibhoudend en begrenzen de watervoerende lagen.

De warmteuitwisseling in de bodem vindt hoofdzakelijk plaats door geleiding, grondwaterstroming en convectie oefenen alleen in bijzondere gevallen een belangrijke invloed uit op het thermische gedrag van een systeem. De belangrijkste thermische bodemeigenschappen zijn de warmtecapaciteit, de warmtegeleiding, de stabiele bodemtemperatuur en geothermische gradiënt. In Nederland varieert de gemiddelde bodemtemperatuur tot diepten van circa 100 meter van 8 tot 14 °C. De temperatuur – diepte gradiënt is normaal gesproken eerst een afnemende temperatuur tussen het maaiveld en diepten tot ongeveer 20 meter. Hieronder zal de temperatuur toenemen als gevolg van de geothermische gradiënt. Tot een diepte van 1 à 2 meter zal een duidelijke seizoensafhankelijk temperatuureffect optreden. In bebouwde gebieden is de bodemtemperatuur over het algemeen hoger (tot circa 3 °C) dan in landelijke gebieden. Bij landelijke gebieden die bebouwd worden en worden uitgerust met warmtepompen kan dus de geprojecteerde afkoeling van de bodem als gevolg van langdurige warmte-ontrekking deels teniet worden gedaan door een extra opwarming van de bodem als gevolg van het wijzigen van de thermische eigenschappen van het oppervlak.

2.3 Bestaande normen

Internationaal zijn er verschillende normen specifiek voor verticale bodemwarmtewisselaars en daarnaast algemene normen voor met de uitvoering samenhangende werkzaamheden. Een overzicht van de diverse Europese normen, normen opgesteld binnen de International Energy Agency (IEA) en normen voor individuele landen, wordt gegeven in Bijlage II.

De volgende Nederlandse Normen worden van toepassing geacht op het uitvoeren van een ontwerp en de constructie van verticale bodemwarmtewisselaarssystemen:

- BRL-9501. Certificatie van 'methoden voor het berekenen van het energiegebruik van gebouwen'
- ISSO publikatie 51. Warmteverliesberekening voor woningen en woongebouwen.
- ISSO publikatie 53. Warmteverliesberekening voor utiliteitsgebouwen.
- NEN 5064. Verwarmings- en koelinstallaties. Berekeningen van drukverliezen in leidingen.
- NEN 5066. Warmteverliesberekening voor gebouwen, berekening van het benodigde vermogen voor het verwarmen van een ruimte.

- NEN 5104 (1989). Geotechniek: Classificatie van onverharde grondmonsters.
- NEN 5119 (1991). Geotechniek: Boren en monsterneming in grond.
- NEN 5753 (1994). Bepaling van lutumgehalte en korrelgrootte van grondmonsters met behulp van zeef en pipet.
- NEN 7200 (1988). Kunstofleidingen voor het transport van gas, drinkwater en afvalwater. Stuiklassen van buizen en hulpstukken van PE met een dichtheid van ten minste 930 kg/m³.
- NEN-EN12715 (2000). Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk; Grouting.
- NEN-EN12716 (2001). Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk; Jet grouting.
- NEN-EN-ISO 14688-1 (2001). Geotechniek: identificatie en classificatie van grond; Deel 1: identificatie en beschrijving.

Daarnaast zijn er verschillende andere publicaties die van toepassing kunnen zijn:

- EGB – Regelement Erkenningregeling EGB, Normen voor de goedkeuring van Boorinstallaties.
- ISO565 (1990) Test sieves -- Metal wire cloth, perforated metal plate and electroformed sheet -- Nominal sizes of openings.
- ISSO publicatie 18. Leidingnetberekening.
- KIWA, BRL-K 533/02. Beoordelingsrichtlijn Buizen van PE voor het transport van drinkwater.
- KIWA, SWE 99.009. Schoonmaken leidingnetten; handleiding voor het opzetten, uitvoeren en controleren van schoonmaakprogramma.
- Montage richtlijnen Rollmaplast (Wavin, 1994).
- NEN 3650-1 (2001). Eisen voor buisleidingsystemen – Deel 1: Algemeen. (ontwerpnorm).
- Stichting CKB - Certificatieregeling Kabelinfrastructuur Buizenlegbedrijven.

Naast deze normen zullen ook andere normen (ARBO wetgeving, bodemverontreiniging) van toepassing zijn, maar die hebben niet direct betrekking op het verticale bodemwarmtewisselaarsysteem maar op de omstandigheden die samenhangen met het uitvoeren van dat werk.

3 ONTWERP GESLOTEN VBWW

3.1 Achtergronden

Voor een gesloten verticaal bodemwarmtewisselaarsysteem wordt ten allen tijde een ontwerp opgesteld. Alvorens het ontwerp op te stellen is al vastgesteld dat het gebruik van een VBWW systeem op de locatie en voor de specifieke toepassing haalbaar is. Het uitvoeren van een haalbaarheidsonderzoek is geen onderwerp van de richtlijn.

Doel van het VBWW-systeemontwerp is:

- Een verticaal bodemwarmtewisselaarsysteem te ontwerpen, zodanig dat de energiebehoefte (verwarming en koeling) van het object geleverd kan worden op een economische wijze, zonder grote overdimensionering.
- Ontwerpen en installeren van een duurzaam systeem, dat wil zeggen een systeem met een lange levensduur (circa 50 jaar) en lage milieu-belasting.
- Ontwerpen van een efficiënt energiesysteem, dat wil zeggen met zo laag mogelijke gebruiks- en onderhoudskosten.

Bij een ontwerp en installatie van een bodemwarmtewisselaarsysteem wordt een inventarisatie uitgevoerd met betrekking tot de volgende gegevens:

- **Informatie over de locatie**
 - Algemene locatieinformatie, waaronder: kadastrale gegevens, beschikbaar oppervlak, positie technische ruimte en geveldoorvoer horizontaal leidingwerk, eventuele bouwtekeningen.
 - Toekomstig gebruik of bestemmingsplan van het voor het VBWW-systeem in beslag genomen oppervlak.
 - Beschikbare vrije werkruimte, aanwezigheid werkwater/elektriciteit, ondergrondse infrastructuur (kabels en leidingen).
 - Informatie bodemopbouw, grond/grondwaterkwaliteit, mogelijke aanwezigheid verontreinigingen, gebiedsspecifieke bodembeschrijving, mogelijke aanwezigheid boringsvrije zone of waterwinning.
 - Informatie toegankelijkheid (b.v. beperkingen toegangstijden), bereikbaarheid locatie in relatie tot gewicht en maten materieel.
- **Projectinformatie**
 - Mogelijk noodzakelijke vergunningen/toestemmingen voor het installeren van bodemwarmte-wisselaars en inbrengen in de bodem (boren of drukken).
 - Start-datum, vaststellen aantal werkbare dagen.
 - Inventarisatie ARBO regelgeving, verzekering(en), contractvorm, bestek voor het werk, ISO certificatie, garantiebepalingen, onderaanneming.
 - Inventariseren beschikbare informatie (rapporten m.b.t. milieukundig onderzoek, geotechnisch onderzoek, etc.).
- **Energieprofiel gebouw/woning**
 - Vaststellen van de energievraag (verwarming en/of koeling), minimaal de maandelijkse vraag.

- Vaststellen van de pieklast verwarming en/of koeling, vermogen (kW) en duur (uur).
- Vaststellen van het aantal draaiuren warmtepomp (verwarming en/of koeling).
- **Warmtepomp**
 - Vermogen (verwarming en/of koeling) en COP bij verschillende brontemperaturen.
 - Debiet over de warmtepomp.
 - Gegevens bronpomp (vermogen, debiet, maximaal toelaatbaar opvoerhoogteverlies).
- **Geologie, geohydrologie, geochemie, thermische bodemeigenschappen**
 - Lokale en regionale bodemopbouw en geohydrologie (doorlatendheid, porositeit, stijghoogte, verhang, geschatte grondwaterstroming, freatisch niveau, minimaal op basis van Grondwaterkaart van Nederland, NITG, RGD).
 - Gegevens sonderingen: weerstand en kleef.
 - Grondwaterkwaliteit, aanwezigheid en diepte zoet/zout grensvlak, concentratie methaan, EC, pH.
 - Mogelijke aanwezige kwel, inzijging.
 - Thermische eigenschappen bodem (temperatuur, warmtegeleidingscoëfficiënt, warmtecapaciteit, geothermische gradiënt).
- **Techniek inbrengen wisselaars**
 - Keuze inbrengtechniek, diepte, afstand tussen individuele wisselaars.
 - Diameter, afwerking (afvulling, kleistoppen) van geboorde of gedrukte gaten.
 - Beheersing van het proces, inclusief verwerking mogelijk vrijkomende boorspoeling/grond.
 - Gewicht en dimensies (lengte, breedte, hoogte) gebruikte materieel.
- **Type warmtewisselaar**
 - Materiaal (MDPE/HDPE/Polybutheen), drukklasse, dimensies.
 - Type: Concentrisch / U-lus (enkel – dubbel) / anders (omschrijven), afstandshouders.
 - Horizontale leidingen materiaal en appendages, lastechniek, apparatuur.
 - Verdelers/verzamelaars.
- **Oplevering**
 - Mechanische-sterktetest en druktest van het systeem.
 - Voorspoelen en vullen van het systeem.
 - Beschrijving en documentatie van het systeem, locatie verticale wisselaars en horizontaal leidingwerk.
 - Overdrachtsformulier.
- **Nazorg**
 - Controle antivries-samenstelling.

3.2 Demarcatie systemen

De richtlijn maakt onderscheid in kleine en grotere systemen. Voor een klein systeem zal de mogelijke onderlinge beïnvloeding van individuele wisselaars eenvoudig beperkt kunnen worden, terwijl de kosten van een uitgebreid onderzoek en ontwerp niet reëel zijn. Voor een groter project moet, om redenen van garanties en kwaliteitsborging, altijd een ontwerpstudie worden uitgevoerd. De demarcatie tussen grote en kleine systemen wordt gelegd op een totaalvermogen (verwarming en/of koeling) van 25 - 35 MWh/jaar, of een piekvermogen van 25 kW. Dit komt overeen met een wooneenheden-equivalent van 5.

Kleine systemen beperken zich tevens tot monovalente systemen met een maximum van 1500 draaiuren per jaar. Voor systemen met bijverwarming of meer draaiuren is een beperkte analyse van het energieprofiel niet voldoende.

3.3 Inventarisatie gegevens

3.3.1 Algemene locatieinformatie

De voor het ontwerp noodzakelijke locatieinformatie omvat minimaal het beschikbare (vrije) oppervlak en dimensies van de locatie (kadastrale gegevens). De globale positie van het wisselaarveld moet worden vastgesteld, alsmede de locatie van de horizontale leidingen en de positie van de muurdoorvoer naar de technische ruimte. In verband met de uit te voeren grondwerkzaamheden is het nodig vast te stellen of er sprake is van een mogelijke bodemverontreiniging of andere beperkende factoren (boringvrije zone). Aanwezigheid van ondergrondse kabels en leidingen wordt geïnventariseerd en de heersende grondwaterstand wordt bepaald.

Deze informatie is beschikbaar bij de projectontwikkelaar of hoofduitvoerder. De informatie kan worden opgevraagd bij het kadaster en bevoegd gezag, meestal de milieudienst van de gemeente, regio of provincie. Wanneer werkzaamheden (deels) op de openbare ruimte worden uitgevoerd wordt een KLIC¹¹⁾ melding gedaan.

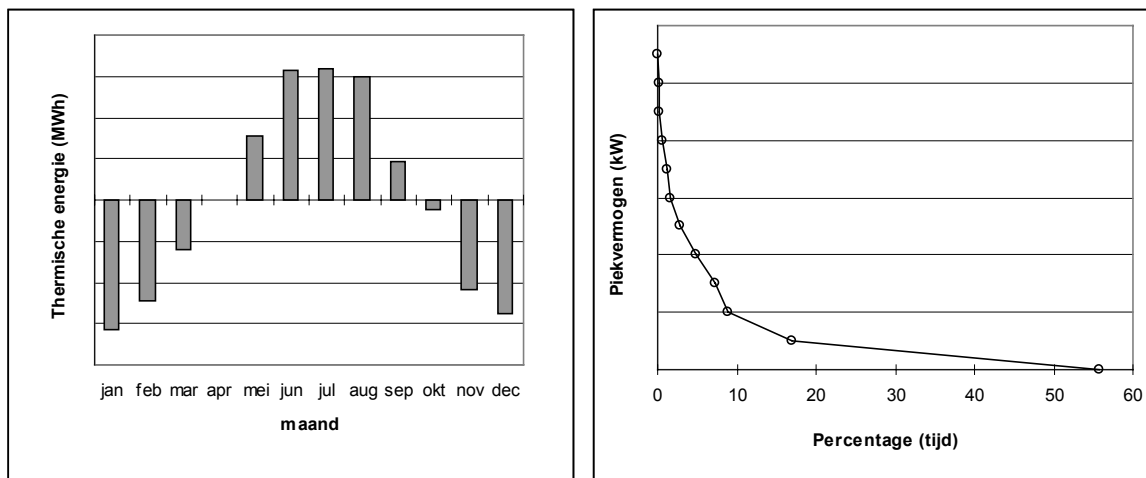
3.3.2 Energieprofiel

Het energieprofiel (de maandelijkse thermische energievraag en pieklastduurkromme, Figuur 1) is een belangrijke randvoorwaarde voor het ontwerp van een bodemwarmtewisselaarsysteem. Bij het thermische gedrag van een bodemgekoppelde warmtepomp kan onderscheid gemaakt worden in een snelle en langzame respons. De trage respons wordt bepaald door het langdurige gemiddelde energiegebruik: het jaarlijkse energieprofiel bepaalt de gemiddelde thermische respons van het systeem.

Afhankelijk van de energiebalans (netto verwarmingsvraag, netto koelvraag of gebalanceerde vraag) zal de bodem over een langere periode opwarmen of afkoelen (Figuur 2). Daarbij kan altijd nog een aanzienlijke seizoensmatige fluctuatie van de bodemtemperatuur optreden.

De bodem, in de nabijheid van de VBWW, reageert snel op een momentane vraag (puls) wanneer de warmtepomp in bedrijf komt (Figuur 2). Deze respons is onder andere afhankelijk van het vermogen geleverd door de warmtepomp en de duur van de puls, en wordt op de gemiddelde bodemtemperatuur gesuperponeerd. Het ontwerp van een VBWW systeem hangt af van de energievraag van het gebouw gedurende meerdere jaren, uitgedrukt als bijvoorbeeld de gemiddelde maandelijkse energievraag, van het opgestelde warmtepompvermogen en van de duur van de pieklast.

¹¹ Kabels en Leidingen Informatie Centrum

Figuur 1. Geïdealiseerd energieprofiel (links), met zowel verwarmingvraag als koeling/regeneratie, en

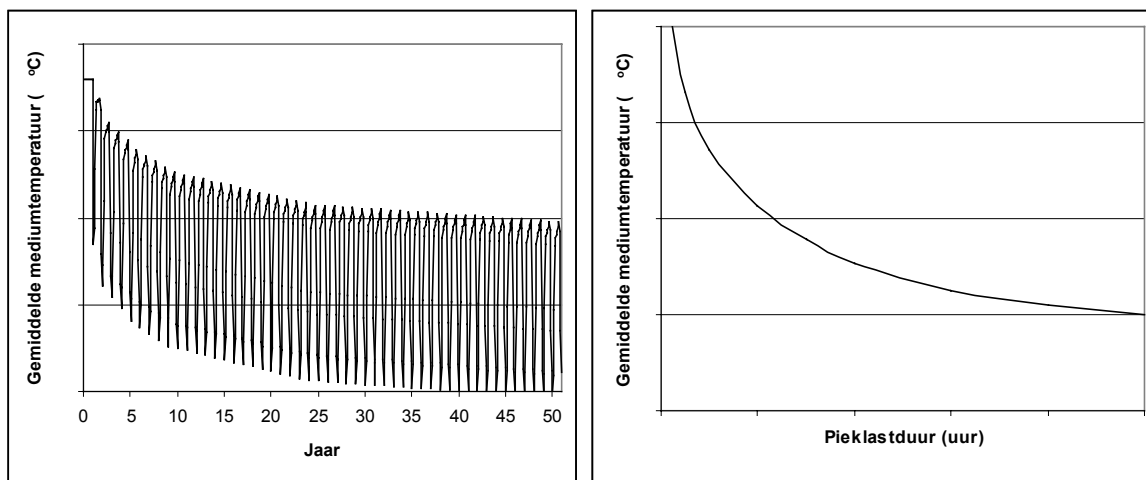
pieklast-duurkromme (rechts).

Figuur 2. Trage respons over een periode van 50 jaar (links, gemiddelde respons verwarmingsvraag, geen koeling/regeneratie) en snelle (rechts, pieklast) respons van een bodemwarmtewisselaarsysteem.

3.3.2.1 beperkt systeem

Veelal is alleen een transmissieverlies (conform NEN 5066 en BRL 9501, zie ook ISSO publicatie 51 en 53) beschikbaar. Voor kleinere projecten kan dan worden volstaan met gebruik van de energieverdeling van een referentiewoning (tabel 1). Het opgestelde piekvermogen wordt direct afgeleid van de opgestelde warmtepomp en de mediumtemperatuur. Deze Novem referentiewoningen zijn gebaseerd op EPN berekeningen en hebben daarmee een beperkte toepasbaarheid. Voor zover tijdens het schrijven van dit rapport bekend, zijn er echter geen betere gegevens beschikbaar. Het is van belang dat in de toekomst goede referentiegegevens beschikbaar komen, gebaseerd op dynamische simulatie en monitoring van standaard woningtypen.

3.3.2.2 nominaal systeem



Voor grotere projecten is het sterk aan te bevelen een dynamische numerieke of semi-dynamische berekening uit te voeren. Deze berekeningen zijn gebaseerd op TRNSYS [17], BLAST [18] of ESP-r [19] dan wel een vergelijkbaar model of methode. De berekeningen

worden minimaal uitgevoerd voor een gemiddelde klimatologisch jaar en voor meer extreme klimatologische omstandigheden, hierbij wordt bijvoorbeeld gebruikt gemaakt van een standaard referentiejaar (TRY). Resultaten omvatten minimaal een maandelijks energieprofiel (MWh verwarmingslast en eventueel koel- of regeneratielast), een piekvermogen (kW) en een maximale duur van een pieklast (uur), dit is de langste aaneengesloten periode waarin de warmtepomp 80 – 90% van de tijd in bedrijf is.

Tabel 1. Energievraag referentiewoningen, in MJ/jaar en MWh/jaar (bron: NOVEM¹²).

Woningtype	Oppervlakte (m ²)	Energieverbruik (MJ)			
		verwarming	tapwater	totaal	totaal per m2
Tuinkamerwoning, tussenwoning (EPC 0,93)	111,4	11999	17693	29692	266,54
Tuinkamerwoning, kopwoning (EPC 0,95)	111,4	16549	17693	34242	307,38
Twee-onder-een-kap (EPC 0,94)	133,7	21877	17987	39864	298,16
Woongebouw (EPC 0,94)	1795,6	204157	259984	464141	258,49

Woningtype	Oppervlakte (m ²)	Energieverbruik (MWh)			
		verwarming	tapwater	totaal	totaal per m2
Tuinkamerwoning, tussenwoning (EPC 0,93)	111,4	3,34	4,92	8,25	0,07
Tuinkamerwoning, kopwoning (EPC 0,95)	111,4	4,60	4,92	9,52	0,09
Twee-onder-een-kap (EPC 0,94)	133,7	6,08	5,00	11,08	0,08
Woongebouw (EPC 0,94)	1795,6	56,76	72,28	129,03	0,07

3.3.3 Vermogen aan de bodem (bron)

Het vermogen dat door de warmtepomp, per tijdstap, aan de bodem onttrokken (of, bij mechanische koeling, toegevoerd) wordt, is bij een gesloten bodemwarmtewisselaarsysteem niet per definitie constant maar kan variëren met de heersende temperatuur in de bodem en de afgiftesysteem-temperatuur. Idealiter is een brontemperatuur – vermogenscurve beschikbaar, lopend van circa –5 °C tot 45 °C voor verschillende afgiftesysteem-temperaturen. Over het algemeen zijn alleen gegevens beschikbaar met betrekking tot totaal vermogen, verdampers vermogen en COP¹³, bij een beperkt aantal temperaturen, bijvoorbeeld bij $T_{\text{bron}} / T_{\text{afgifte}}$ 0/35 °C, 0/25 of 25/10 °C.

Naast mechanische koeling kan ook passieve (vrije koeling) of regeneratie met behulp van zonnecollectoren worden toegepast. Deze vermogens worden direct aan de bodem toegevoerd.

Het ontwerp wordt over het algemeen opgesteld met het vermogen van de warmtepomp bij een door de fabrikant opgegeven referentie temperatuur (de temperatuur waarbij het vermogen en de COP is bepaald) van bijvoorbeeld 5 °C, terwijl de temperatuur in de bodemwarmtewisselaar

¹² <http://www.epn.novem.nl/home.html>

¹³ Coëfficiënt of Performance

tijdens verwarming in werkelijkheid vaak lager zal zijn. Feitelijk is er dan sprake van overdimensionering, omdat het werkelijk afgegeven vermogen dan lager is. Bij dat lagere vermogen zal de temperatuur in het VBWW-systeem hoger zijn dan bij de ontwerpberekeningen vastgesteld. Voor de situatie waarbij mechanische koeling wordt toegepast geldt hetzelfde: een brontemperatuur hoger dan de referentietemperatuur van de warmtepomp houdt een lager afgegeven koelvermogen in, en daarmee tevens een minder hoge brontemperatuur.

Van belang is dan wel vast te stellen of het voor de woning noodzakelijke vermogen bij de werkelijke brontemperatuur nog door de warmtepomp geleverd wordt.

Bodemopbouw en thermische bodemeigenschappen

De bodemopbouw op de locatie is een van de belangrijkste parameters. Drie essentiële vragen die beantwoord moeten worden zijn:

1. Welk type inbrengtechniek en gewenste einddiepte?

Voor de inbrengtechniek is het van belang om vast te stellen of de gewenste einddiepte bij de voorkomende bodemopbouw en gekozen inbrengtechniek haalbaar is. Het ontwerp wordt afgestemd op de haalbare einddiepte.

2. Noodzakelijke afdichtings-diepten?

Naast het afdichten aan de bovenzijde (in elk geval bij geboorde gaten, zie § 4.3.4), moeten tenminste de aanwezige scheidende lagen correct worden afgedicht. Daartoe moet de diepte van eventueel aanwezige scheidende lagen in kaart worden gebracht. In verband met de afdichting is het belangrijk het chloride gehalte, in elk geval kwalitatief (zoet/zout), vast te stellen.

3. Wat zijn de thermische bodemeigenschappen?

Met name de warmtegeleidingscoëfficiënt en de warmtecapaciteit kunnen worden geschat op basis van alleen de bodemopbouw.

Gegevens over de bodemopbouw worden verkregen uit de Grondwaterkaart van Nederland [20], de Geologische Kaart van Nederland [21] of worden opgevraagd bij het DINO¹⁴⁾ loket van het TNO-NITG¹⁵⁾.

3.3.4.1 beperkt systeem

Een indicatieve beschrijving van de bodemopbouw kan worden opgesteld op basis van de Grondwaterkaart van Nederland en de Geologische kaart van Nederland, of op basis van gebiedsspecifieke ervaring van de uitvoerende boorder/sondeerder. Geschikte boringen worden gekozen, zodanig dat een goed beeld ontstaat van de globale bodemopbouw op de locatie. Als alternatief wordt de beschrijving van de bodemopbouw voor tenminste twee boringen uit het DINO loket geëvalueerd. De omschrijving omvat tenminste tot de verwachte einddiepte: de dikte van de mogelijk aanwezige deklaag, dikte en textuur watervoerende pakketten, dikte en textuur scheidende lagen.

Van de boringen/sonderingen heeft tenminste één een diepte overeenkomend met de gewenste einddiepte van het VBWW systeem. De grootste afstand van de gebruikte bodembeschrijvingen tot de locatie is niet groter dan 1 à 2 km.

Indien scheidende lagen worden doorsneden wordt het hele traject afgedicht met behulp van een bentoniet-cement grout, behalve wanneer tijdens de uitvoering van de werkzaamheden

¹⁴ Data en Informatie Nederlandse Ondergrond

¹⁵ Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO

voldoende kan worden vastgesteld op welke diepte de afdichtende laag zich bevindt en op welke diepte afdichtmateriaal wordt aangebracht. Dit wordt, voor elke boring/sondering, in een logboek bijgehouden. Voor het overige deel wordt het gat aangevuld met zand.

Het thermische ontwerp houdt rekening met het al dan niet afdichten van een deel van, of het gehele, traject.

3.3.4.2 nominaal systeem

Beschrijving van de bodemopbouw kan gemaakt worden op basis van de Grondwaterkaart van Nederland en de Geologische kaart van Nederland. Geschikte boringen worden gekozen, zodanig dat een goed beeld ontstaat van de globale bodemopbouw op de locatie. Deze beschrijving wordt aangevuld met tenminste vijf boringen uit het DINO loket.

Van de boringen hebben tenminste drie een diepte overeenkomend met de gewenste einddiepte van het VBWW systeem. De grootste afstand van de gebruikte boringen tot de locatie is niet groter dan 1 à 2 km.

De bodemopbouw wordt in detail beschreven, waarbij aandacht wordt besteed aan de ruimtelijke variatie en mogelijke inschakelingen van ander materiaal dan de hoofgrondsoort. Boorprofielen worden gedocumenteerd.

Indien er niet voldoende gegevens voorhanden zijn, of er andere aanwijzingen zijn omtrent mogelijke afwijkingen, wordt tenminste één proefboring op de locatie uitgevoerd. Van deze proefboring wordt een beschrijving gemaakt conform NEN 5104 en de Standaard BoorBeschrijvingsmethode (NITG). Van elk te onderscheiden grondsoort wordt van tenminste één monster een gecertificeerde zeefkromme (NEN 5753, ISO 565) samengesteld.

Indien scheidende lagen worden doorsneden wordt het hele dieptetraject afgedicht met behulp van een bentoniet-cement grout, behalve wanneer bij het uitvoeren van de boringen voldoende kan worden vastgesteld op welke diepte de afdichtende laag zich bevindt en op welke diepte er afdichtmateriaal wordt aangebracht. Dit wordt, voor elke boring, in een boor-log bijgehouden. In het boorlog worden vermeld: diepteinterval van de scheidende laag, diepteinterval aangebrachte afdichtingslagen en totaal verbruikte massa (kg) navulmateriaal, uitgesplitst per materiaalsoort.

Het thermische ontwerp houdt rekening met het type afdichting en de lengte waarover dit is aangebracht. De toegepaste afdichtmaterialen beïnvloeden namelijk de warmteoverdracht in het boorgat. Aanbeveling is ervoor zorg te dragen dat de verschillen tussen de warmteoverdracht in de individuele boorgaten kleiner is dan 20%.

3.3.4.3 Bepalen thermische bodemeigenschappen

Thermische bodemeigenschappen worden vastgesteld met behulp van referentiewaarden (tabel 2). Voor een gegeven boorprofiel wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt berekend als een gewogen gemiddelde, met behulp van de formule:

$$\lambda_p = \frac{\sum_{h=1}^{h=n} (\lambda_h * D_h)}{\sum_{h=1}^{h=n} D_h} \quad \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Waar:

λ_p : Gewogen gemiddelde warmtegeleidingscoëfficiënt van het bodemprofiel ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

λ_h : Warmtegeleidingscoëfficiënt van de grondsoort van de horizon ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) (tabel 2).

D_h : Dikte van de horizon (m).

De warmtecapaciteit kan op analoge manier worden berekend, waarbij referentiewaarden uit tabel (2) kunnen worden gebruikt of de warmtecapaciteit van een horizont kan worden afgeleid uit informatie over de samenstelling van de grondsoort (organische stof, minerale delen en bodemvocht) met de formule:

$$C_h = (2,7\phi_h + 1,9\phi_m + 4,2\theta) \quad \text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$$

Waar:

C_h : Warmtecapaciteit grond horizont ($\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$).

ϕ_h : Volumefractie organische stof.

ϕ_m : Volumefractie minerale delen.

θ : Volumefractie vocht.

Tabel 2. Referentiewaarden warmte-eigenschappen typische grondsoorten: minimum maximum en typische waarde voor de warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit van enkele veel voorkomende grondsoorten.

Vocht	Textuur	Warmtegeleidingscoëfficiënt W/m, K			Warmtecapaciteit MJ/m ³ , K		
		min	max	typ	min	max	typ
Verzadigd	Klei	0,90	2,22	1,60	1,60	3,40	2,40
	Leem	1,00	2,35	1,70	1,60	3,40	1,60
	Veen	0,20	0,70	0,40	0,50	3,80	2,20
	Zand, Matig grof t/m matig fijn	1,73	5,02	2,20	2,20	2,86	2,50
	Zand, Uiterst grof t/m middel grof zand (grindhoudend)	1,80	5,02	2,30	2,10	2,86	2,45
	Zand, slibhoudend	1,50	2,30	1,90	2,20	2,86	2,50
	Mergel	1,96	2,78	2,20	2,30	2,30	2,30
Onverzadigd	Klei	0,40	0,90	0,40	1,51	1,61	1,60
	Zand, Matig grof t/m matig fijn	0,27	0,75	0,40	1,30	1,60	1,40
	Zand, Uiterst grof t/m middel grof zand (grindhoudend)	0,35	0,50	0,45	1,20	1,60	1,35
	Zand, slibhoudend	0,27	0,75	0,40	1,30	1,60	1,40
	Zand, compact	1,1	1,5	1,35	1,30	1,60	1,40

Deze tabel geeft indicatieve waarden. De textuur, korrelgrootte, poriëngrootte en pakking van een specifieke bodemlaag, de mate van vochtigheid en eventuele grondwaterstroming zullen deze waarden sterk kunnen beïnvloeden.

Daarnaast is het mogelijk om verschillende thermische eigenschappen direct te meten met behulp van een In Situ Thermische Respons Test [22], of te bepalen aan ongestoorde bodemmonsters met behulp van een naaldmethode [23].

3.3.5 Geohydrologie

Voor het ontwerp van een bodemwarmtewisselaarsysteem kan de geohydrologie op een locatie van belang zijn. Allereerst moet worden vastgesteld of er geen sprake is van significante kwel. Daarnaast heeft grondwaterstroming invloed op het thermische gedrag van een bodemwarmtewisselaar. Deze invloed kan positief zijn (verhoogde regeneratie voor zowel verwarming als koelingstoepassing) als negatief (verhoogde verliezen bij projecten met warmte-opslag). Geohydrologie wordt in kaart gebracht op basis van de Grondwaterkaart van Nederland, of met behulp van stijghoogtegegevens uit DINO Grondwater.

3.3.5.1 beperkt systeem

Voor een beperkt systeem kan worden volstaan met een korte beschrijving verkregen uit de Grondwaterkaart van Nederland of op basis van gebiedsspecifieke ervaring van de uitvoerende boorder. Hierbij wordt met name vastgesteld of er sprake is van een stijghoogteverschil tussen de bovenste laag (meestal de deklaag of het freatische watervoerende pakket) en een daaronder aanwezige watervoerende laag (mogelijke kwel). Bij mogelijke kwel dient de afdichting van zeer hoge kwaliteit te zijn.

3.3.5.2 nominaal systeem

De geohydrologische schematisatie wordt in kaart gebracht op basis van de beschrijvingen van de bodemopbouw (§4.3.3) en DINO Grondwater en REGIS¹⁶. Voor de verschillende geohydrologische eenheden wordt de doorlatendheid (K-waarde, tabel 3) en de stijghoogtegradiënt vastgesteld. Op basis daarvan wordt zowel de Darciaanse als de effectieve grondwaterstromingssnelheid en richting bepaald. De Darciaanse grondwaterstromingssnelheid wordt berekend door:

$$Q = -K \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad \text{ms}^{-1}$$

Waar:

Q: Darcy snelheid (ms⁻¹).

K: Doorlatendheid (ms⁻¹).

Δh: Stijghoogteverschil (m).

Δx: Doorstroamlengte (m).

($\frac{\Delta h}{\Delta x}$ is de stijghoogtegradiënt). De effectieve grondwaterstromingssnelheid houdt rekening met de porositeit van het materiaal en is groter dan de Darciaanse snelheid. De effectieve grondwaterstromingssnelheid wordt berekend door de Darciaanse snelheid te delen door de porositeit.

Wanneer bij warmte-opslag of regeneratie van de bodem grondwaterstroming een belangrijk effect op de temperatuurontwikkeling kan hebben is, bij een verwachte effectieve grondwaterstromingssnelheid van > 5 m/jaar, een gedetailleerde effectstudie (gekoppelde modellering van grondwater en temperatuur) aan te bevelen [24]. In andere gevallen (met name bij koelingsgedomineerde projecten) kan, in verband met het voorkomen van overdimensionering, een uitgebreide geohydrologische- en effectenstudie zinvol zijn.

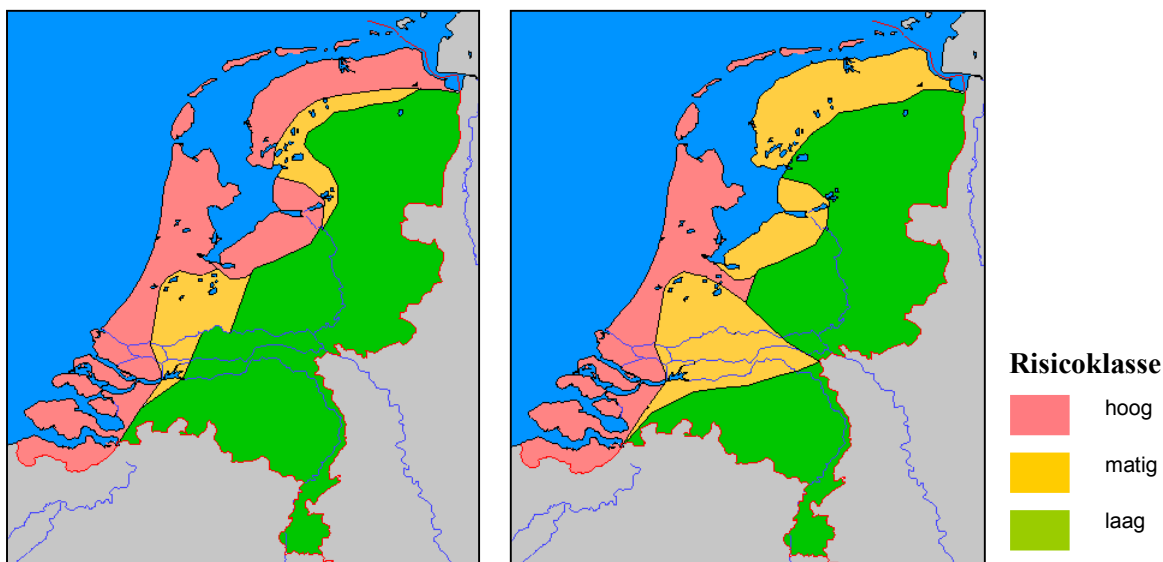
¹⁶ Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem

Tabel 3. Geohydrologische parameters voor verschillende geohydrologische eenheden.

Eenheid	Doorlatendheid K (mdag ⁻¹)	Porositeit
Grind	1000	0,25 – 0,35
Klei	0,0001	0,35 – 0,55
Leem	0,0003 – 0,0005	0,25 – 0,45
Veen	0,00001 – 0,01	0,60 – 0,80
Zand met grind	60 – 100	0,20 – 0,35
Zand, grof	50 – 60	0,30 – 0,45
Zand, fijn	40 – 50	0,25 – 0,55

3.3.6 Grondwaterkwaliteit

In grote delen van Nederland is er sprake van brak tot zout grondwater. Deze saliniteit van het grondwater heeft met name invloed op de zwelling bentoniet mengsels die gebruikt worden als afdichting van scheidende lagen [25]. Globaal zijn de risicogebieden weergegeven in Figuur 3. Bij het aanbrengen van een kleistop dient daarom het bentoniet mengsel over voldoende overlengte te worden aangebracht om een afdoende afdichting te verkrijgen. Minimale overlengte bedraagt ± 3 meter (zowel boven als onder de scheidende laag). Aan te bevelen is gebruik van een voorgemengd water - bentoniet – hoogovencement (65:25:10) mengsel, met water van $E_c < 150 \mu\text{S}$.

Figuur 3. Indicatie risicogebieden toepassing bentoniet. Links: ondiep (tot 50 m -NAP), rechts diep (100 – 250 m -NAP). (bron: Groenholland)

3.3.7 Bodemwarmtewisselaar

In Nederland worden voornamelijk verticale bodemwarmtewisselaars toegepast bestaande uit U-lussen of concentrische wisselaars. Het lustype en de dimensionering van de lus hebben, samen met de toegepaste inbrengtechniek, (boor-)gatafwerking en hydraulisch ontwerp een aanzienlijke invloed op de thermische prestatie van de warmtewisselaar. Met name in Zweden is hier onderzoek naar gedaan ([26], [27], [28], [29]).

Gezien het streven naar grote aantallen geplaatste systemen is de kwaliteit van het gebruikte materiaal en de constructie van de wisselaars van het allergrootste belang. Materiaal van de lussen (horizontaal en verticaal) is MDPE (Medium Density PolyEthyleen), PE100. MDPE is minder gevoelig voor materiaalmoetheid als gevolg van temperatuurwisselingen dan HDPE. Materiaalspecificaties voldoen aan KIWA, BRL-K 533/02, en/of DIN8074/DIN8075/ISO161. De noodzakelijke lasverbindingen om een lus te maken zijn normaal gesproken spiegelllasverbindingen. Deze worden uitgevoerd volgens richtlijn NEN 7200.

Bij temperaturen groter dan circa 60 °C kan HDPE of MDPE niet meer worden toegepast voor een VBWW systeem. Het toe te passen materiaal is dan Polybutheen. Systemen waarin dergelijke hoge temperaturen worden bereikt, worden in deze richtlijn verder niet nader behandeld.

U-lussen zijn veelal geprefabriceerd en fabrieksmatig getest, daarbij is een goede kwaliteitscontrole mogelijk. Concentrische lussen worden ook wel in het veld geconstrueerd. Kwaliteitsborging van de daarbij toegepaste spiegelllas is minder goed mogelijk.

Toe te passen drukklasse is afhankelijk van de einddiepte, minimale drukklassen zijn weergegeven in tabel 4. bij de keuze van de materiaalkwaliteit en drukklasse speelt de temperatuurcorrectiefactor een rol. Deze correctiefactor geeft aan hoe de bedrijfstemperatuur de langeduursterkte beïnvloedt. Voor PE80 en PE100 zijn deze factoren bij 26 – 30 °C en 41 – 45 °C respectievelijk 0,8 en 0,5.

PE leidingen en hulpstukken worden al geruime tijd in de bodem toegepast voor onder andere water- en gasleidingen. Ook als bodemwarmtewisselaar hebben deze materialen al een lange geschiedenis in o.a. de Verenigde Staten, Scandinavië, Duitsland, Zwitserland en Oostenrijk. Deze materialen hebben zich al geruime tijd bewezen in ondergrondse toepassingen en vallen onder verschillende normen, die direct betrekking hebben op gebruik in de ondergrond. Echter, er zijn of komen ook alternatieve materialen in gebruik. Daarbij kan het gebruik van deze materialen in de ondergrond nieuw zijn, of in elk geval die specifieke toepassing of die specifieke combinatie nieuw. Voor gebruik in een verticaal bodemwarmtewisselaarsysteem, moeten deze materialen minimaal voldoen aan de eisen zoals die voor PE gesteld zijn (langeduursterkte, drukklasse, wanddikte) voor wat betreft levensduur, lekdichtheid en corrosiebestendigheid. Het materiaal mag geen milieuhygiënisch risico vormen (bijvoorbeeld uitlogen). Wanneer verbindingen van andere materialen worden toegepast dient met name corrosiebestendigheid onder omstandigheden in de bodem (waarbij zowel de redoxomstandigheden als de zuurgraad sterk kan variëren) als de lekdichtheid van het systeem gedurende de levensduur (50 jaar) gewaarborgd te worden.

De drukklasse van het PE materiaal is een statistische maat: gegeven de maximale druk zal het materiaal over een levensduur van 50 jaar, bij 20 °C, slechts 5% kans op falen hebben. Gezien de geprojecteerde aantallen VBWW systemen en gezien het feit dat (bij een koelingstoepassing) hogere temperaturen kunnen optreden, achten wij een 95% betrouwbaarheid te laag. Daarom wordt er voor een hogere drukklasse gekozen dan wanneer alleen met de heersende overdruk rekening wordt gehouden.

Tabel 4. Aanbevolen drukklasse bij een gegeven einddiepte.

Einddiepte	Minimale drukklasse	Wandikte (m) bij lusdiameter		
		0,025 m	0,032 m	0,040 m
0 - 50	PN8 - SDR 11	0,0023	0,003	0,0037
50 - 100	PN10 - SDR 11	0,0023	0,003	0,0037
> 100	PN16 - SDR 11	0,0023	0,003	0,0037

Bij de dimensionering van de wisselaars wordt gestreefd naar een zo klein mogelijke thermische weerstand bij een gering opvoerhoogteverlies (wat gecompenseerd moet worden met behulp van een pomp). Bij monovalente systemen (met alleen verwarming) is dit minder kritisch wanneer de bronpomp alleen in het verwarmingsseizoen wordt ingeschakeld: een groot deel van de pompenergie (80 – 90%) wordt namelijk omgezet in warmte en aan het circuliatiemedium afgegeven.

3.3.7.1 Concentrische warmtewisselaars

Concentrische wisselaars worden in Nederland met name toegepast in combinatie met een inbrengechniek gebaseerd op sonderen (drukken). Deze warmtewisselaar bestaat, in de eenvoudige variant, uit een buitenbuis die aan één zijde wordt afgesloten met een stop. Binnen in deze buitenbuis wordt een tweede buis gebracht waardoor er twee stroomkanalen ontstaan. Gangbare maat voor de buitenbuis is 40 mm, voor de binnenbuis wordt veelal 25 mm toegepast. Thermische weerstanden zijn, voor enkele veel voorkomende combinaties, weergegeven in tabel 5. Rekening moet worden gehouden met het feit dat er sprake is van een contactweerstand, onder ander omdat de drukstang enige overdiameter heeft. Deze contactweerstand moet bij de totale thermische overgangswaerstand worden opgeteld, waarbij de warmtegeleidingscoëfficiënt van het vulmateriaal een gemiddelde van de warmtegeleidings-coëfficiënt van de bodem en water zal zijn.

Deze contactweerstand kan worden berekend met de formule:

$$R_c = \frac{LN \left(\frac{D_{s \tan g}}{D_{vbww}} \right)}{2\pi\lambda}$$

Waar:

R_c : Contactweerstand concentrische VBWW – bodem (K/(W/m)).

D_{stang} : Diameter van de sondeerstang (m).

D_{vbww} : Buitendiameter van de warmtewisselaar (m).

λ : Warmtegeleidingscoëfficiënt vulmateriaal (W/mK).

Tabel 5. Indicatie van de thermische weerstand bodem - medium van enkele typische concentrische verticale bodemwarmtewisselaars bij laminaire ($Re \approx 1000$) en turbulente ($Re \approx 3000$) stroming (merk op dat voor het bereiken van deze Reynolds waarden ten opzichte van de U-lussen veel grotere debieten nodig zijn. In de praktijk zullen de R_b waarden daarom dichter bij de laminaire waarden liggen). Contactweerstand voor twee bodemtypen is tevens weergegeven.

VBWW	Buis diameter (uitwendig/inwendig) (m)	L (m)	R_c (5 cm stang) K/(W/m)		R_b Laminair K/(W/m)	R_b Turbulent K/(W/m)
			λ 1,6	λ 1,8		
Concentrisch	0,04/0,025	30	0,022	0,012	0,13	0,11
Concentrisch	0,04/0,025	40	0,022	0,012	0,14	0,11
Concentrisch	0,04/0,025	50	0,022	0,012	0,15	0,11

3.3.7.2 U-lus warmtewisselaars

Een U-lus warmtewisselaar bestaat uit een enkele buis die, met behulp van een aangelaste (spuitgegoten) U-bocht of andere appendage, aan de onderzijde is gebogen. Bepalend voor de thermische prestatie is de dimensionering van de lus, de dimensionering en afwerking van het boor- of sondeergat en de plaatsing van de lus in het boor- of sondeergat. Met name bij met een bentoniet of bentoniet-cement afgedicht boorgat is het, om reden van de lage thermische geleiding van de boorgatvulling, nuttig om dubbele U-lussen en afstandhouders toe te passen. In andere gevallen hebben dubbele U-lussen alleen zin om de hydraulische diameter te vergroten (in verband met beperken van het opvoerhoogteverlies). Indicatie van de thermische weerstanden voor enkele VBWW configuraties zijn in tabel 6 weergegeven.

Tabel 6. Indicatie van de thermische weerstand bodem - medium van typische U-lus verticale bodemwarmtewisselaars bij laminaire ($Re \approx 1000$) en turbulente ($Re \approx 3000$) stroming voor verschillende warmtegeleidingscoëfficiënten boorgatvulling. Waarden op basis van 15% monopropyleenglycol, 0,12 m boorgat, U-lus met afstandhouders.

VBWW	Buis diameter (m)	L (m)	R _b Laminair K/(W/m)			R _b Turbulent K/(W/m)		
			λ 0,5	λ 1,0	λ 2,0	λ 0,5	λ 1,0	λ 2,0
U-lus	0,025	50	0,35	0,25	0,21	0,26	0,16	0,11
U-lus	0,025	100	0,41	0,33	0,31	0,27	0,17	0,13
U-lus	0,025	150	0,50	0,47	0,47	0,28	0,19	0,16
U-lus	0,032	50	0,31	0,23	0,20	0,22	0,14	0,10
U-lus	0,032	100	0,36	0,30	0,28	0,23	0,15	0,12
U-lus	0,032	150	0,42	0,42	0,42	0,24	0,17	0,14
U-lus	0,040	50	0,26	0,21	0,18	0,18	0,12	0,09
U-lus	0,040	100	0,31	0,26	0,24	0,18	0,13	0,10
U-lus	0,040	150	0,39	0,35	0,34	0,19	0,14	0,11

3.3.7.3 Overige warmtewisselaars

Alhoewel momenteel de U-lus en concentrische wisselaarconfiguratie het meest worden toegepast kunnen er in de toekomst ook andere wisselaarconstructies ontwikkeld worden. Deze wisselaars moeten voldoen aan de materiaaleisen zoals in de richtlijn omschreven. De leverancier stelt, middels metingen of berekeningen, de noodzakelijke gegevens met betrekking tot thermische weerstand van de warmtewisselaar in een boor- of sondeergat beschikbaar.

3.3.8 Circulatiemedium

Als circulatiemedium wordt meestal een antivriesmengsel (ethyleenglycol of propyleenglycol, in andere landen ook wel ethanol) toegepast. Soms wordt water gebruikt. Andere mogelijke antivries mengsels worden niet beschouwd. De keuze van het circulatiemedium beïnvloedt de thermische eigenschappen en de pompeigenschappen (met name door de viscositeit). Eigenschappen van de toe te passen mengsels worden gegeven in Bijlage III. Belangrijk is op te merken dat deze waarden temperatuurafhankelijk zijn. Het is dus van belang om de correcte waarde te kiezen, en voor systemen met zowel een verwarmende als koelende functie rekening te houden met verschillen die kunnen optreden als gevolg van verschil in bedrijfstemperatuur bij verwarmen en koelen.

Zowel ethyleenglycol als monopropyleenglycol zijn zeer goed oplosbaar in water en breken in de bodem snel af. Daarbij geldt ethyleenglycol als toxisch, terwijl monopropyleenglycol als niet toxisch is geklaccificeerd. In Duitsland en Zwitserland worden deze stoffen als niet belastend

voor het grond(-water)milieu beschouwd [8]. In Nederland is voor ethanol (CAS nummer 64-17-5) een ad-hoc advies opgesteld m.b.t. toegestane waarden in de bodem en grondwater [30]. Ethanol wordt in Nederland niet in bodemwarmtewisselaarsystemen gebruikt. De voorlopige humaan-EBVC grond is 8071 mg/kg, voor het grondwater 785 mg/l. Tevens is voor monopropyleenglycol (CAS nummer 57-55-6) een ad-hoc advies opgesteld m.b.t. toegestane waarden in de bodem en grondwater [31]. De voorlopige humaan-EBVC grond is 146 mg/kg, voor het grondwater 107 mg/l. Voor ethyleenglycol wordt in de Wet Bodembescherming als indicatief niveau voor ernstige verontreiniging een waarde van 100 mg/kg droge stof aangehouden voor grond, terwijl voor grondwater een waarde geldt van 5500 µg/l.

3.3.8.1 beperkt systeem

De concentratie van het medium wordt zo gekozen dat er een vorstbescherming is van tenminste $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ofwel minimaal een 25% monopropyleen- of ethyleenglycol oplossing.

3.3.8.2 nominaal systeem

De concentratie van het medium wordt gekozen zodanig dat het vriespunt tenminste $5\text{ }^{\circ}\text{K}$ lager is dan de laagst voorkomende mediumtemperatuur. De minimum temperatuur hangt af van de temperatuur in de bodem rond de warmtewisselaar (aan het einde van de koudste maand), het piekvermogen van de warmtepomp en de duur van de pieklast.

3.4 Ontwerpcriteria

Het ontwerp van het bodemwarmtewisselaarsysteem wordt gemaakt op basis van een temperatuurcriterium. Dit criterium betreft de gemiddelde maandelijkse mediumtemperatuur (of $T_{\text{bron, intrede}}$ en $T_{\text{bron, uittrede}}$ temperatuur), en de temperatuur tijdens maximale belasting (pieklast) in de koudste maand (verwarming) of de warmste maand (koeling). De ontwerptemperatuur bandbreedte zal liggen tussen de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bij lagere temperaturen kan bevriezing rond de warmtewisselaar op gaan treden, hetgeen niet wenselijk is. Bij hogere temperaturen kan het materiaal van de lussen zacht worden en deformeren. Ook wordt bij hogere temperaturen de veroudering van het materiaal versneld.

De minimale temperatuur in het systeem wordt gekozen op basis van de volgende criteria:

1. In de bodem rond de warmtewisselaar treedt geen (langdurige) bevriezing op. Als vuistregel hanteren we dat het temperatuurverschil tussen het circuliatiemedium en het boorgat globaal gelijk is aan de boorgatweerstand (R_b K/(W/m)) * energieonttrekking (ϕ , W/m). Bij een redelijk typische boorgatweerstand van $0,1\text{ K/(m/W)}$, en een energie-onttrekking van 25 W/m is het temperatuurverschil $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. De mediumtemperatuur ($T_{\text{bron-in}}$) mag dan niet lager worden dan $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ om bevriezing in het boorgat te voorkomen. Bij een onttrekking van 50 W/m is het temperatuurverschil $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, de mediumtemperatuur mag dan niet lager worden dan $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ om bevriezing in het boorgat te voorkomen.
2. Het door de warmtepomp afgegeven vermogen (en daarmee tevens de COP) daalt bij dalende brontemperatuur. Wanneer de gemiddelde brontemperatuur van $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ naar $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ daalt zal het afgegeven vermogen met circa $15 - 20\%$ afnemen. Bij $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ zal de afname, ten opzichte van $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, al 35% kunnen bedragen. De bron-uitrede temperatuur mag niet zo laag worden dat de warmtepomp het voor de woning noodzakelijke piekvermogen niet meer kan leveren. Daarbij mag de temperatuur in het afgiftesysteem gedurende enige tijd (2 à 3 uur) lager zijn dan de normale temperatuur in het afgiftesysteem (bijvoorbeeld $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in plaats van $35\text{ }^{\circ}\text{C}$). Voor het opwarmen van een woning kan dan, weliswaar bij een lagere temperatuur in het afgiftesysteem, een hoger vermogen worden geleverd.
3. Afhankelijk van de kwaliteit van de gegevens (energieprofiel, rekening houdend met klimatologische variatie en variatie in gebruik van het gebouw, thermische bodemeigenschappen, kwaliteit boorgatafwerking etc.) wordt een veiligheidsmarge van 2 à $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ aangehouden.

3.5 Thermisch Ontwerp

Doel van het thermische ontwerp is, gegeven de randvoorwaarden zoals in voorgaande paragrafen omschreven, de dimensies van het bodemwarmtewisselaarsysteem (configuratie, aantal, diepte, tussenafstand) vast te stellen. Daarbij mogen de temperatuurcriteria uit §4.4 niet overschreden worden. Er zijn verschillende methoden om de nodige berekeningen uit te voeren, daarbij kunnen drie categorieën worden onderscheiden, n.l. analytische methoden, semi-analytische methoden gebaseerd op numerieke modellen en numerieke modellen. Deze laatste categorie methoden zijn in principe het meest nauwkeurig en zijn in staat om gekoppeld grondwaterstroming, warmte- en stoftransport in de bodem te berekenen. Het opstellen van een numeriek model is echter complex en vergt gedetailleerde invoergegevens, daardoor is het toepassen van een numeriek model alleen in uitzonderlijke gevallen aanbevolen (bijvoorbeeld bij zeer grote en complexe systemen, aanwezigheid van aanzienlijke grondwaterstroming).

3.5.1 Berekeningen

Er zijn verschillende analytische methoden ontwikkeld, gebaseerd op Fourier's wet van geleiding en Lord Kelvin's lijnbron methode. Met deze methoden kan relatief eenvoudig de temperatuurontwikkeling rond een enkelvoudige geïdealiseerde bodemwarmtewisselaar worden berekend. Deze methoden zijn alleen geldig voor bodemwarmtewisselaars die elkaar niet beïnvloeden en onder evenwichtstoestand (evenwicht tussen de energieonttrekking en de temperatuurgradiënt in de bodem). Eén van de methoden is gebaseerd op de door Ingersoll et al beschreven lijnbronmethode [32], door Guernsey et al [33] vereenvoudigd tot:

$$\Delta T = \frac{0,1833\phi}{\lambda} \left(\log_{10} \frac{\alpha t}{r^2} + 0,106 \frac{r^2}{\alpha t} + 0,351 \right) \text{ } ^\circ\text{K}$$

Waar:

ΔT : Temperatuurverandering ($^\circ\text{K}$)

ϕ : Warmteflux per meter warmtewisselaar (W/m).

λ : Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

r : Afstand tot het centrum van de warmtewisselaar (m).

t : Tijd (s)

α : Temperatuursvereffeningscoëfficiënt (m^2s^{-1}).

De temperatuursvereffeningscoëfficiënt kan worden berekend uit:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$$

Waar:

α : Temperatuursvereffeningscoëfficiënt (m^2s^{-1}).

ρ : Dichtheid bodem (kgm^{-3}).

C_p : Specifieke warmtecapaciteit bodem ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Deze formule (geldig wanneer $\alpha t/r^2 > 1$) geeft de temperatuur in de bodem op een bepaalde afstand van het centrum van de warmtewisselaar, de temperatuur van het circuliatiemedium wordt niet direct gegeven. Deze kan worden afgeleid met behulp van de vuistregel gegeven in §4.4.

Tegenwoordig wordt, voor de dimensionering van bodemwarmtewisselaarsystemen, voornamelijk gebruik gemaakt van software gebaseerd op het aan de universiteit van Lund ontwikkelde numerieke simulatiemodel SBM [26]. Op basis van dit model zijn dimensieloze stap-respons functies (g-functies) gedefiniëerd voor de energieflex – tijd respons van verschillende warmtewisselaar-geometrieën [27]. Op basis van die oplossingen zijn diverse programma pakketten ontwikkeld (bijvoorbeeld Earth Energy Designer [34], GHLEPRO [35], EWS [36]) die relatief eenvoudig in gebruik zijn en zeer goede resultaten geven. Een vergelijking van zes methoden met een gekalibreerd model (TRNSYS-SBM, [37]) liet zien dat de methoden onderling minder dan 7% verschillen. Vergelijking van bijvoorbeeld, EED berekeningen met 1,5 jaar monitoring gegevens [38] liet zien dat EED een warmteonttrekking, zowel wat betreft de basislast als de pieklast, goed kan voorspellen.

3.5.1.1 beperkt systeem

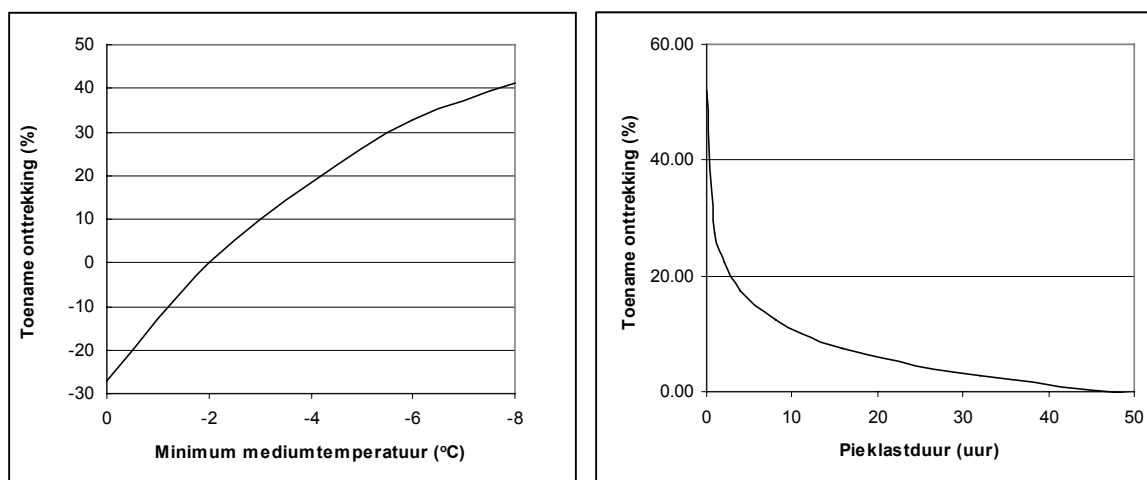
Voor een beperkt systeem is het mogelijk een bodemwarmtewisselaarsysteem te dimensioneren op basis van enkele kengetallen. Onder een beperkt systeem wordt hier verstaan een systeem met een totaalvermogen (verwarming/koeling) van maximaal 25 - 35 MWh/jaar, of een piekvermogen van 25 kW. Dit komt overeen met een wooneenheden-equivalent van 5. De beperkte systemen zijn monovalente systemen met een maximum van 1500 draaiuren per jaar. Voor systemen met meer bijverwarming of meer draaiuren is een beperkte analyse van het energieprofiel niet voldoende.

Voor de berekeningen is uitgegaan van een totale energieonttrekking van 5, 8 of 12 MWh per eenheid per jaar, waarbij nog onderscheid is gemaakt in systemen zonder en met energiebalans. Piekvermogens zijn vastgesteld op 4, 6, 9 en 10 kW, in de volgende combinaties: totale last 5 MWh, pieklasten 4 en 6 kW; totale last 8 MWh, pieklasten 6 en 8 kW; totale last 12 MWh, pieklasten 8 en 10 kW. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een bedrijfsperiode van 25 jaar, pieklastduur is voor alle berekeningen vastgesteld op 48 uur. Voor de warmtepomp is een COP van 3,5 gekozen. Voor een systeem met als inbrengmethode drukken zijn de berekeningen gebaseerd op een concentrische warmtewisselaar. Daarbij is de contactweerstand vastgesteld op 0,02 K/(W/m). Voor een systeem met als inbrengtechniek boren is gekozen voor een enkele U-lus met afstandhouders, met als boorgatvulling een bentoniet/cement/zand mengsel (warmtegeleidingscoëfficiënt 0,8 W/mK) of als boorgatvulling zand (warmtegeleidingscoëfficiënt 2,0 W/mK). Alle berekeningen zijn uitgevoerd met zowel een laminaire als een turbulente stroming in de lus. Criterium was een temperatuur tijdens pieklast van $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dat is de gemiddelde mediumtemperatuur tijdens pieklast, afhankelijk van de ΔT over de warmtepomp kunnen de $T_{\text{bodem-in}}$ en $T_{\text{bodem-uit}}$ globaal liggen tussen -5 en $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Met dit temperatuurcriterium is er voor alle scenario's een redelijke balans tussen prestatie (COP), grootte van het bodemwarmtewisselaarsysteem en veiligheidsmarge.

Aangezien het om een beperkt ontwerp gaat, bedoeld voor relatief kleine systemen met navenant veel uitwisseling met de omgeving, is de afstand tussen de wisselaars minder bepalend. De in de tabellen 8a t/m 8d weergegeven waarden zijn representatief voor afstanden tussen de wisselaars van 5 tot 10 meter. Een afstand van minder dan vijf meter tussen de individuele wisselaars vergroot de noodzakelijke lengte van het VBWW systeem met 25%, afstanden groter dan 10 meter verminderen de noodzakelijke lengte met circa 15%.

Een verticale bodemwarmtewisselaar kan op verschillende manieren hydraulisch of thermisch geoptimaliseerd worden. Wanneer bijvoorbeeld dubbele U-lussen worden toegepast kan de thermische prestatie met globaal 10 – 20% verbeteren. Voor de beperkte ontwerpen die hier gepresenteerd worden zijn dergelijke optimalisaties niet doorgerekend.

Figuur 4: Toename van het mogelijk te onttrekken vermogen (watt/meter) in relatie tot de gekozen toegelaten minimum temperatuur (links) en pieklastduur (rechts). Uitgangspunt is het temperatuurcriterium van $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (d.w.z.: linker grafiek bij $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 25% minder watt/meter ten



opzichte van het bij $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ onttrokken vermogen).

De toegestane temperatuur tijdens pieklast en de pieklastduur hebben een grote invloed op de uiteindelijke lengte van het VBWW systeem (figuur 4). Bij een verlaging van de toegestane minimumtemperatuur tot -6 kan 50% meer energie per strekkende meter warmtewisselaar worden onttrokken. Daarbij moet wel rekening worden gehouden met het feit dat wanneer lagere temperaturen in de VBWW worden toegestaan de prestatie van de warmtepomp sterk zal afnemen, hetgeen alleen acceptabel is wanneer die hoge lasten incidenteel optreden. De gekozen pieklastduur van 48 uur is representatief voor pieklastduren van circa 10 tot 100 uur. Alleen wanneer de pieklastduur in een systeem veel korter is dan 10 uur, is er sprake van een aanzienlijke overdimensionering.

Berekeningen zijn uitgevoerd voor een systeem met 5 wooneenheden. Tabel 7 geeft de overige randvoorwaarden voor de berekeningen weer. Berekeningen zijn geldig voor mede-eigenschappen van 25% – 35% mengsels monpropyleenglycol (of mengsels met gelijkwaardige eigenschappen).

Tabel 7: Randvoorwaarden scenario's bodemwarmtewisselaarsysteem, dimensionering beperkt ontwerp.

Component	Parameter	Waarde	
Bodem	Warmtegeleiding (W/m, K)	1,6 – 1,8 – 2,0 – 2,2	
	Warmtecapaciteit (MJ/m ³ , K)	2,16 10 ⁶	
	Bodemtemperatuur (°C)	9,0	
Verticale bodem warmtewisselaar	Configuratie	Rechthoek, 3 x 5	
	Afstand tussen warmtewisselaars (m)	6	
	Installatie	U-LUS - CONCENTRISCH	
	Afvulling, warmtegeleiding (W/m, K)	0,8 – 2,0 (U-LUS)	
	Leiding - bodem contactweerstand (K/(W/m))	0,02 (CONCENTRISCH)	
Circulatiemedium	Monopropyleenglycol	25%	35%
	Warmtegeleiding (W/m, K)	0,448	0,4095
	Warmtecapaciteit (J/kg,K)	3879	3742
	Dichtheid (kg/m ³)	1031,2	1046,6
	Viscositeit (kg/m, s)	0,00457	0,00882
	Vriespunt (°C)	-9	-15,5

Tabel 8a: Per energie-eenheid aan te brengen lengte VBWW systeem: laminair stromings regime en alleen verwarmingsvraag (5/0, 8/0 en 12/0 MWh).

Laminair, alleen verwarming, geen energiebalans							
	λ W/mK	Basislast: 5/0 MWh		Basislast: 8/0 MWh		Basislast: 12/0 MWh	
		Piek 4 kW	Piek 6 kW	Piek 6 kW	Piek 8 kW	Piek 8 kW	Piek 10 kW
Conc.	1,6	180	250	305	385	465	585
	1,8	160	230	275	350	425	525
U-lus Bentoniet (λ 0,8)	1,8	170	240	280	370	415	485
	2,0	160	225	265	330	385	460
	2,2	150	215	210	315	365	435
U-lus Zand (λ 2,0)	1,8	150	210	255	315	375	450
	2,0	140	195	235	295	350	420
	2,2	130	185	220	280	330	390

Tabel 8b: Per energie-eenheid aan te brengen lengte VBWW systeem: turbulent stromings regime en alleen verwarmingsvraag (5/0, 8/0 en 12/0 MWh).

Turbulent, alleen verwarming, geen energiebalans							
	λ W/mK	Basislast: 5/0 MWh		Basislast: 8/0 MWh		Basislast: 12/0 MWh	
		Piek 4 kW	Piek 6 kW	Piek 6 kW	Piek 8 kW	Piek 8 kW	Piek 10 kW
Conc.	1,6	175	240	290	345	415	480
	1,8	160	220	260	320	375	440
U-lus Bentoniet (λ 0,8)	1,8	140	195	240	290	345	450
	2,0	130	180	220	270	320	420
	2,2	120	170	205	255	300	395
U-lus Zand (λ 2,0)	1,8	125	170	210	255	315	350
	2,0	115	155	190	235	290	330
	2,2	105	145	175	220	270	310

Tabel 8c: Per energie-eenheid aan te brengen lengte VBWW systeem: laminair stromings regime, energiebalans (5/5, 8/8 en 12/12 MWh).

Laminair, energiebalans							
	λ W/mK	Basislast: 5/5 MWh		Basislast: 8/8 MWh		Basislast: 12/12 MWh	
		Piek 4 kW	Piek 6 kW	Piek 6 kW	Piek 8 kW	Piek 8 kW	Piek 10 kW
Conc.	1,6	105	160	150	205	190	250
	1,8	100	150	140	190	180	235
U-lus Bentoniet (λ 0,8)	1,8	110	160	150	205	190	310
	2,0	105	155	145	200	185	295
	2,2	100	150	140	190	180	290
U-lus Zand (λ 2,0)	1,8	90	135	130	170	160	205
	2,0	85	130	125	165	155	200
	2,2	80	130	120	160	150	195

Tabel 8d: Per energie-eenheid aan te brengen lengte VBWW systeem: turbulent stromings regime, energiebalans (5/5, 8/8 en 12/12 MWh).

Turbulent, energiebalans							
	λ W/mK	Basislast: 5/5 MWh		Basislast: 8/8 MWh		Basislast: 12/12 MWh	
		Piek 4 kW	Piek 6 kW	Piek 6 kW	Piek 8 kW	Piek 8 kW	Piek 10 kW
Conc.	1,6	105	155	145	195	180	235
	1,8	100	145	135	185	175	220
U-lus Bentoniet (λ 0,8)	1,8	85	125	120	160	15	230
	2,0	80	120	115	155	145	220
	2,2	80	115	110	150	140	215
U-lus Zand (λ 2,0)	1,8	75	105	100	130	125	155
	2,0	70	100	95	125	120	150
	2,2	70	95	90	120	115	140

3.5.1.2 nominaal systeem

Op basis van het energieprofiel (§4.3.2), de bodemparameters (§4.3.4) en informatie over het boorgat en lusconfiguratie wordt een berekening uitgevoerd om de noodzakelijke lengte, waarbij de gestelde temperatuurcriteria niet worden overschreden, vast te stellen. De rekenmethode is tenminste in staat om:

- De gemiddelde maandelijkse temperatuurrepons te berekenen, op basis van de bodemeigenschappen, eigenschappen van de bodemwarmtewisselaar en gevraagd energieprofiel. Dit over een voldoende lange periode (50 jaar), rekening houdend met de mogelijke interactie tussen de individuele wisselaars.
- De mediumtemperatuur te berekenen op basis van de temperatuurgradiënt in de bodem, de lusconfiguratie, boor- of sondeergatconfiguratie en mediemeigenschappen. Hiervoor moet, in principe, de boor- of sondeergatweerstand berekend kunnen worden. Mediemeigenschappen worden gekozen bij de bedrijfstemperatuur.
- Temperatuurrepons tijdens piekbelasting (pieklastduurkromme) te berekenen.

Met name de temperatuurrepons gedurende een pieklast zal afhankelijk zijn van de gekozen boor- of sondeergatconfiguratie (diameter, afvulling) en lusconfiguratie (lustype, dimensies), de mediemeigenschappen en het stromingsprofiel, aangezien deze de thermische weerstand bepalen. Hier zal in het ontwerp enige optimalisatie plaatsvinden. De ontwerpberekeningen bepalen minimaal de volgende waarden:

1. De minimale (of, bij regeneratieve systemen de optimale) afstand tussen de individuele wisselaars. Bij grotere projecten wordt tevens de gevoeligheid van deze parameter vastgesteld, met als doel vast te stellen hoe groot de maximale afwijking mag zijn.
2. De gemiddelde maandelijkse mediumtemperatuur in het tweede en laatste jaar van bedrijf. Het laatste bedrijfsjaar zal jaar 50 zijn.
3. Een pieklast-duurkromme bij het nominale vermogen (temperatuur bronzijde/afgiftezijde bij verwarming 5/35 °C; bij koeling 30/15 °C).
4. Een pieklast-duurkromme bij het maximale vermogen (temperatuur bronzijde/afgiftezijde bij verwarming 5/20 °C; bij koeling 20/15 °C).

Het ontwerp wordt vastgelegd in een boorplan. Het verdient aanbeveling om de gevoeligheid van het thermische ontwerp vast te stellen voor de volgende parameters:

1. Bodemtemperatuur $\pm 10\%$.
2. Warmtegeleidingscoëfficiënt (bodem en boorgat) $\pm 15\%$ (indien geschat), $\pm 5\%$ (indien gemeten).
3. Wisselaar lengte $\pm 5\%$.
4. Warmtewisselaar tussenafstand $\pm 10\%$.
5. Boorgatdiameter $\pm 30\%$.
6. Medie eigenschappen, samenstelling mengsel $\pm 10\%$.
7. Energielast, totale energielast $\pm 15\%$.

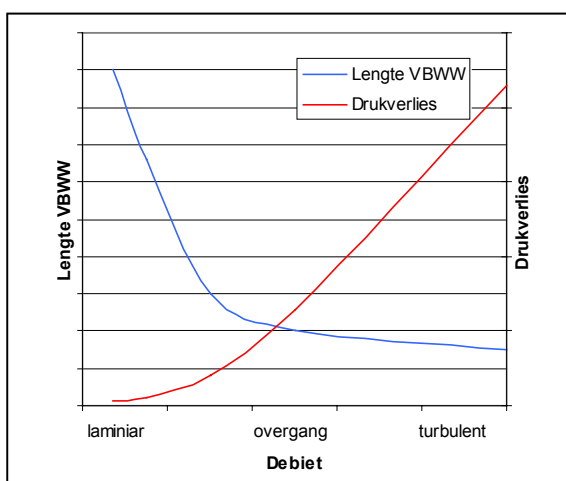
3.6 Hydraulisch ontwerp, pompkeuze

Voor een lage thermische weerstand in het bodemwarmtewisselaarsysteem is een turbulente stroming gunstig, maar daarbij kunnen grote druk- of opvoerhoogteverliezen optreden die door pompenergie gecompenseerd moeten worden. Bij laminaire stroming zijn de opvoerhoogteverliezen gering, maar is er een grote thermische weerstand waarbij voor eenzelfde vermogen een grotere bodemwarmtewisselaar nodig is (figuur 5).

Hoewel, voor de verwarmingssituatie een groot deel van de pompenergie niet verloren gaat, maar in warmte wordt omgezet en afgegeven aan het circuleriemedium, is het zaak het opvoerhoogteverlies te beperken en voor een bodemwarmtewisselaarsysteem het opvoerhoogteverlies te berekenen zodat kan worden vastgesteld welke pomp toegepast moet worden.

Een opvoerhoogteverlies wordt veroorzaakt door wrijving, verschil in hoogte en door omzetting van kinetische energie. Opvoerhoogteverliezen worden berekend op basis van NEN 5064. We beschouwen één volledig circuit. Parallele circuits mogen in totale lengte niet meer dan 10% verschillen, zijn de verschillen groter dan dienen de circuits individueel afgeregeld te worden.

Figuur 5. Relatie tussen debiet, opvoerhoogteverlies en lengte VBWW.



Om het opvoerhoogteverlies, voor elk leidingstuk met een constante diameter, veroorzaakt door wrijving te berekenen [39] wordt eerst het Reynoldsgetal vastgesteld:

$$\text{Re} = \frac{\rho D v}{\pi}$$

Waar:

Re: Reynolds getal

ρ : Dichtheid vloeistof (kgm^{-3}).

D: Diameter van de leiding (m)

v: Stroomsnelheid medium (ms^{-1})

π : Dynamische viscositeit medium (mPa.s)

Indien de dynamische viscositeit niet, maar de kinematische viscositeit wel bekend is dan kan het Reynolds getal berekend worden met:

$$\text{Re} = \frac{D v}{\vartheta}$$

Waar:

ϑ : Kinematische viscositeit (m^2s^{-1}).

Bij een Reynoldsgetal ≤ 2300 is de stroming laminair, bij Reynoldsgetal ≥ 3500 is de stroming turbulent. Daartussen is een overgangsgebied. Voor laminaire stroming ($\text{Re} \leq 2300$) volgt het wrijvingsgetal f uit:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

Berekening van het wrijvingsgetal voor turbulente stroming is complexer. Voor gladde leidingen (zoals PE of plastic) geldt, bij $\text{Re} \geq 3500$ (volledig turbulent):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\text{Re} \sqrt{f}}{2,51} \right)$$

Bij Reynoldsgetalen in het overgangsgebied kan het wrijvingsgetal geïnterpoleerd worden door:

$$f = \frac{f_{lam} \cdot (3500 - \text{Re}) + f_{turb} \cdot (\text{Re} - 2300)}{3500 - 2300}$$

Het opvoerhoogteverlies als gevolg van wrijvingsverliezen in een leidingdeel kan nu worden berekend met:

$$\Delta P = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

waar:

- ΔP : Opvoerhoogteverlies (m).
 L: Lengte van de leiding (m).
 D: Diameter van de leiding (m).
 v : Stroomsnelheid medium (ms^{-1}).
 g : Versnelling door de zwaartekracht (ms^{-2}).

Naast het opvoerhoogteverlies als gevolg van wrijving spelen nog twee effecten een rol: de verliezen veroorzaakt door plaatstelijke weerstanden als gevolg van bochten of appendages en verliezen door hoogteverschillen in de leidingen. Omdat een bodemwarmtewisselaarsysteem een gesloten systeem is, zijn er geen opvoerhoogteverliezen door hoogteverschillen. De additionele plaatselijke weerstanden als gevolg van bochten of andere hulpstukken in het leidingensysteem, of als gevolg van overgangen in diameters, spelen met name een rol bij turbulente stroming. Ze kunnen worden afgeleid uit tabellen met weerstandscoëfficiënten (NEN 5064) waarmee de weerstand kan worden berekend:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho}{2} v^2$$

Hier is:

- ΔP : Opvoerhoogteverlies (m).
 ξ : Weerstandscoëfficiënt voor het betreffende hulpstuk.
 ρ : Dichtheid vloeistof (kgm^{-3}).
 v : Stroomsnelheid medium (ms^{-1}).

De snelheid v betreft de gemiddelde instroomsnelheid bij hulpstukken met een ingaande en uitgaande zijde, of de gemiddelde stroomsnelheid van de hoofdstroom bij splitsende en verzamelende stukken.

De weerstand die wordt veroorzaakt doordat leidingen met verschillende diameters aan elkaar zijn gekoppeld, voor de berekeningen van deze weerstandscoëfficiënten wordt verwezen naar de NEN 5064.

Voor een concentrische warmtewisselaar is de weerstandscoëfficiënt voor de overgang van de inwendige naar de uitwendige buis niet beschreven. Zonder rekening te houden met de omkering van de stroming, ligt de weerstandscoëfficiënt voor deze overgang waarschijnlijk tussen de 0,5 – 0,8.

Het totale opvoerhoogteverlies in een leidingtraject is gelijk aan de som van alle individuele leidingverliezen:

$$\Delta P = \sum_{n=1}^i \left(f \frac{Lv^2}{D2g} \right)_n + \sum_{n=1}^j \left(\xi \frac{\rho}{2} v^2 \right)_n$$

Hier is i het aantal rechte leidingstukken en j het aantal hulpstukken.

Met name de berekening van het wrijvingsgetal bij turbulente stroming is niet eenvoudig, er moet door proberen (iteratief) naar de goede waarde worden gezocht. Daarbij wordt steeds een waarde voor f in de formule ingevuld, todat de met de formule berekende waarde voor f gelijk is aan de in de formule ingevulde waarde voor f . Er zijn enkele computerprogramma's die met behulp van deze formules leidingverliezen kunnen berekenen beschikbaar, bijvoorbeeld [40].

4 INSTALLATIE BODEMWARMTEWISSELAARS

De kwaliteitszorg bij de installatie van een bodemwarmtewisselaarsysteem dient de warmteoverdracht met de bodem te optimaliseren, mogelijke milieueffecten te voorkomen en de werkzaamheden zodanig te coördineren, dat deze goed binnen het bouwproces kunnen worden ingepast. Bij het werk kunnen verschillende fasen worden onderscheiden:

1. Voorbereiding. Gedurende deze fase wordt het bodemwarmtewisselaar-plan met de opdrachtgever en hoofduitvoerder doorgenomen. Een tijdsplanning voor de verschillende werkzaamheden wordt overeengekomen. Noodzakelijke informatie wordt ingewonnen en er wordt nagegaan of de locatie aan de gestelde eisen voldoet met betrekking tot bijvoorbeeld de toegankelijkheid en beschikbare voorzieningen.
2. Installeren van de verticale bodemwarmtewisselaars, door middel van een druk- of boortechniek.
3. Aanleggen van cunetten voor de horizontale aan- en afvoerleidingen, maken van de horizontale verbindingen en muurdoorvoer.
4. Doorspoelen, testen van het VBWW-systeem en afwerken van de cunetten.
5. Oplevering en overdracht bodemwarmtewisselaarsysteem, technische documentatie en aanwijzingen voor gebruik.

Bij het installeren van verticale bodemwarmtewisselaars worden leidingen in de bodem gebracht (door middel van een druk- of boortechniek), worden horizontale sleuven gegraven en worden leidingen gelegd en gelast. Op deze werkzaamheden zijn verschillende richtlijnen en certificeringen van toepassing, waaronder de erkenningsregeling grondboor- en bronbemaalingsbedrijven EGB, certificatieregeling kabelinfrastructuur buizenlegbedrijven (cKb), VM 102 (elektromoflassen) en diverse NEN normen (o.a. NEN 7200 stuiklassen; NEN-EN12715 Grouting; NEN-EN12716 Jet Grouting).

4.1 Voorbereiding en coördinatie werkzaamheden

Tijdens de voorbereiding en coördinatie van de werkzaamheden is er een bijeenkomst met de opdrachtgever en hoofduitvoerder, waarbij de noodzakelijke randvoorwaarden worden besproken en een planning voor de uitvoering van de werkzaamheden wordt opgesteld. Zaken die hierbij aan de orde dienen te komen zijn onder andere:

- Toegang voor materieel tot locatie en opstel- en verplaatsingsmogelijkheden. Hiebij wordt de minimale noodzakelijke vrije ruimte voor het materieel (boorwagen of sondeertruck), met name ook de minimale vrije hoogte, vastgelegd.
- Terreingesteldheid in relatie tot gewicht materieel, indien nodig worden rijplaten gebruikt.
- Aan de hand van het boorplan wordt vastgesteld welke routes over het terrein vrij doorgankelijk blijven. Minimale vrije ruimte ten opzicht van de gevel (rekening houdend met eventuele steigers of aanwezige funderingswerken) wordt vastgelegd.
- Mogelijke aanwezigheid van onder- en bovengrondse kabels, leidingen, aanwezigheid overige (bouw)materialen op locatie.
- Aanwezigheid van werkwater en kwaliteit daarvan (minimaal kwaliteit van het aquifer).
- Bodemkwaliteit in milieuhygiënische zin, mogelijke aanwezigheid verontreiniging. Verwerkingsmogelijkheden vrijkomende grond, aanleg tijdelijk depot.
- Afstemming werkzaamheden met overige betrokkenen.

Bij het uitvoeren van grondwerkzaamheden (graven van de cunetten en weer aanvullen daarvan) is de heersende grondwaterstand van belang. Duidelijk moet zijn of een pompinstallatie of bronering noodzakelijk is en of deze op de locatie aanwezig zijn dan wel aangebracht moeten worden. Eventuele beperkingen met betrekking tot het tijdelijk lozen van grondwater worden aangetekend.

De opdrachtgever waarborgt de kwaliteit van de grond en het grondwater op de locatie.

4.2 Constructie warmtewisselaar

Bodemwarmtewisselaars worden gemaakt uit Polyethyleenbuis, minimaal MDPE – PE100 (voor bedrijfstemperatuur tot maximaal 50 °C), PN8 (tot een diepte van 50 meter), PN10 (tot diepten van 100 meter) of PN16 (voor grotere dieptes). Stijfheidsklasse is SN8 of gelijkwaardig (bestand tegen uitwendige overdruk van 5 bar). Het gebruikte PE materiaal is conform KIWA BRL-K-533/02 of gelijkwaardige norm (bijvoorbeeld SN218-306) gefabriceerd, en is gemerkt (typeaanduiding, fabricagedatum, drukklasse, wanddikte). Wisselaars zijn voorzien van een lengtemarkering (per meter), beginnend bij nul meter en naar boven oplopend.

Bij aanvoer van het materiaal wordt ervoor zorggedragen dat het materiaal schoon en onbeschadigd is. Wisselaars worden voor gebruik visueel geïnspecteerd. Beschadigde wisselaars of leidingmateriaal worden niet toegepast.

Voor U-lus warmtewisselaars worden geprefabriceerde en (druk-)geteste warmtewisselaars gebruikt. Warmtewisselaars, geplaatst met een sondeertechniek waarbij de warmtewisselaar in een beschermde omgeving kan worden samengesteld, kunnen ter plaatse worden geconstrueerd indien wordt voldaan aan de NEN 7200 met betrekking tot stuiklassen.

De aansluiting op de aanvoer- en retourleiding van de concentrische warmtewisselaar is een geprefabriceerde spuitgegoten kop, of kan worden samengesteld uit elektromoffen bestaande uit een T-stuk en verloopstuk voor de inwendige buis. De aansluiting van U-lussen bestaat uit óf een geprefabriceerde appendage (bijvoorbeeld dubbele U-lus), of is samengesteld uit enkele elektromoffen (T-stuk of knie). Er worden ondergronds geen knelkoppelingen of andere mechanische verbindingen gebruikt.

Er worden ondergronds geen metallische appendages gebruikt, behalve wanneer deze daarvoor zijn goedgekeurd. Er worden ondergronds geen verbindingen met afdichtingen bestaande uit O-ringen of andersoortige niet zelf-afsluitende verbindingen gebruikt.

4.2.1 Andere materialen

PE leidingen en hulpstukken worden al geruime tijd in de bodem toegepast voor onder andere water en gasleidingen. Ook als bodemwarmtewisselaar hebben deze materialen al een lange geschiedenis in o.a. de Verenigde Staten, Scandinavië, Duitsland, Zwitserland en Oostenrijk. Deze materialen vallen onder verschillende normen, die direct betrekking hebben op gebruik in de ondergrond. Echter, er zijn of komen in de toekomst ook alternatieve materialen in gebruik. Daarbij kan het gebruik van deze materialen in de ondergrond nieuw zijn, of in elk geval voor deze specifieke toepassing, of in die specifieke combinatie nieuw.

Voor gebruik in een verticaal bodemwarmtewisselaarsysteem, moeten deze materialen minimaal voldoen aan de eisen zoals die voor PE gesteld zijn (langeduursterkte, drukklasse, wanddikte) voor wat betreft levensduur, lekdichtheid en corrosiebestendigheid, bij temperaturen van –10 tot 50 °C. Het materiaal mag geen milieuhygiënisch risico vormen (bijvoorbeeld uitloging). Wanneer verbindingen van andere materialen worden toegepast dient met name corrosiebestendigheid onder omstandigheden in de bodem (waarbij zowel de zuurstofgraad als de redoxpotentiaal sterk kan variëren) als de lekdichtheid van het systeem gedurende de levensduur (50 jaar) gewaarborgd te worden. De installateur is verplicht de geschiktheid van de gebruikte materialen aan te tonen.

4.3 Inbrengtechniek

Inbrengtechnieken kunnen worden onderverdeeld in inbrengtechnieken die met een boorsysteem werken en inbrengtechnieken die met een ander systeem (tril- of druksysteem) werken. Gezien de Nederlandse praktijk voor het inbrengen van verticale bodemwarmtewisselaars, beperkt de richtlijn zich tot het inbrengen met behulp van een druk (sondeer) techniek of met behulp van een boortechniek.

De basis voor de in Nederland toegepaste druktechniek is de sondeertechniek die wordt toegepast voor geotechnisch onderzoek (bijvoorbeeld weerstand- en kleefbepaling ten bate van funderingsonderzoek). Hierbij wordt een holle stalen buis, met aan de onderzijde een conische punt, de grond in gedrukt. De druk wordt gegenereerd door het gewicht (25 tot 40 ton) van de sondeerwagen. In de holle buis wordt vervolgens een concentrische warmtewisselaar ingebracht. Alternatief worden compacte U-lussen ('excentrische wisselaars') in de sondeerstang ingebracht.

Er is een grote verscheidenheid aan boortechnieken, die vrijwel allemaal geschikt zijn voor het inbrengen van verticale bodemwarmtewisselaars, of daarvoor geschikt gemaakt kunnen worden. In de in Nederland voorkomende bodemtypen wordt gebruikt gemaakt van avegaar-boren, spoelboren, spuitboren, zuigboren of liftboren.

Over het algemeen wordt als boortechniek voor het plaatsen van bodemwarmtewisselaars gebruik gemaakt van een zuig- of spoelboortechniek [41]. Bij een spuitboortechniek is de controle over de vorm van het boorgat in feite zo gering dat deze techniek niet aan te bevelen is voor het plaatsen van verticale bodemwarmtewisselaars.

4.3.1.1 Drukken

Het toegepaste boormateriaal is door een bevoegde instantie gekeurd (bijvoorbeeld conform 'EG verklaring van overeenstemming voor machines', richtlijn 89/392EEG). Het beschikken over een VCA-certificaat (Veiligheids Checklist Aannemers) is aan te bevelen, maar niet verplicht. Opdrachtgevers kunnen het als eis stellen om in aanmerking te komen voor hun opdrachten.

Normaal gesproken zal de diameter van de sondeerstang tussen de 0,04 en 0,06 meter liggen. De overdiameter van het sondeergat zal niet groter zijn dan 0,01 – 0,03 m, maar is naast de stangdiameter ook afhankelijk van de diameter van de gebruikte punt. Van elke individuele set geplaatste wisselaars wordt tenminste één log (weerstand en kleef) geregistreerd.

4.3.1.2 Boren

Het toegepaste boormateriaal is door een bevoegde instantie gekeurd (bijvoorbeeld Aboma-Keboma). Boorwerkzaamheden worden uitgevoerd door een bedrijf dat voldoet aan de EGB erkeningsregeling. Het beschikken over een VCA-certificaat (Veiligheids Checklist Aannemers) is aan te bevelen, maar niet verplicht. Opdrachtgevers kunnen het als eis stellen om in aanmerking te komen voor hun opdrachten.

De diameter van het boorgat is zo klein mogelijk in verhouding tot de diameter van de gebruikte bodemwarmtewisselaar, maar wordt zodanig gekozen dat de lus gemakkelijk kan worden ingebracht en het boorgat voldoende stabiel is. Normaal gesproken zal de diameter van het boorgat tussen de 0,10 en 0,2 meter liggen, waarbij de overdiameter van het boorgat ten opzichte van de buitendiameter van de lusconstructie niet groter is dan 0,03 – 0,05 m.

Van elke individuele set geplaatste wisselaars wordt tenminste één boorbeschrijving opgenomen conform NEN 5104.

4.3.1.3 Afstand

Afgezien van de in het ontwerp vastgelegde afstand tussen de individuele wisselaars wordt, afhankelijk van de einddiepte, een minimale werkafstand aangehouden in verband met het risico van het tijdens boren of drukken beschadigen van al geplaatste wisselaars. Deze werkafstand is minimaal 1,5 maal de maximale afwijking van de verticaal van twee wisselaars (tabel 9).

Tabel 9. Indicatieve tussenafstand als functie van einddiepte en scheefstelling.

Afwijking (°)	Einddiepte (m)				
	25	50	100	150	200
1	1,0	2,0	3,5	5,0	7,0
2	2,0	3,5	7,0	10,5	14,0
3	2,5	5,0	10,5	16,0	21,0
4	3,5	7,0	14,0	21,0	28,0
5	4,0	9,0	17,5	26,0	35,0

4.3.2 Vrijkomend materiaal, werkwater

Het gebruikte werkwater is minimaal van een kwaliteit gelijk aan de kwaliteit van het aquifer. Wanneer werkwater in een boorspoeling wordt gebruikt wordt dit ge-recirculeerd of in elk geval opgevangen.

Het vrijkomend materiaal wordt gescheiden van het water. Het materiaal kan, mits de kwaliteit dit toelaat, op de bouwlocatie verwerkt worden. De kwaliteit van het materiaal wordt in overleg met de opdrachtgever of door hem aangewezen persoon vastgesteld.

4.3.3 Inbrengen warmtewisselaar

De warmtewisselaar wordt met schoon water (minimaal drinkwaterkwaliteit) gevuld en onder overdruk (2-3 bar; waterleidindruk) ingebracht. Druk wordt voor en na inbrengen gecontroleerd en in het logboek genoteerd. Toegestane drukverloop is minder dan 0,2 bar of 10%. Druk wordt tot minimaal één uur na het inbrengen van de lus, en eventueel afvullen en/of grouten van het geboorde of gedrukte gat, gehandhaafd.

Bij het inbrengen van de lus wordt krassen of knikken van de lus voorkomen. Een beschadigde lus wordt verwijderd. Onder een beschadigde lus wordt verstaan een lus met een knik of met een kras dieper dan 10% van de wanddikte.

Bereikte einddiepte wordt genoteerd aan de hand van markeringen op de warmtewisselaar. De lus wordt afgedopt en afgetaped. Indien de warmtewisselaar op een plek staat waar verkeer aanwezig is, moet het uitstekend eind op adequate wijze gemarkeerd of afgewerkt worden.

4.3.4 Afwerking boor- of sondeergat

Het boorgat wordt met behulp van een vulpijp onder overdruk afgevuuld met een bentoniet of bentoniet/zand/cement mengsel. Bij een systeem met eenzijdige verwarmingstoepassing, waar kans op plaatselijke bevriezing zou bestaan, wordt een water/bentoniet/cement mengsel (circa 65:25:10, waarbij voldoende plasticiteit wordt behouden). Behalve de vorstgevoeligheid heeft het toepassen van bentoniet als nadeel de lage warmtegeleidingscoëfficiënt van bentoniet-water mengsel ($< 0,7 \text{ W/(mK)}$). Toevoeging van kwartzand verbetert de warmtegeleiding (warmtegeleidingscoëfficiënt $> 0,8 \text{ W/(mK)}$). Het toevoegen van cement voorkomt de problematiek rondom de bevriezing van de grout, maar er moet wel zo weinig cement worden toegevoegd dat de grout voldoende plastisch blijft. Aanbevolen verhoudingen zijn

water/bentoniet/zand/cement: 40:25:25:10. Alternatief kunnen thermisch verbeterde bentoniet of andere zwellende kleien worden toegepast.

Bij een elektrische geleiding (E_c) van het grondwater van > 1000 microSiemens per centimeter ($\mu\text{S}/\text{cm}$) wordt minimaal 10% cement toegevoegd. Het groutmengsel wordt bovengronds gemengd met schoon en zoet water ($E_c < 150 \mu\text{S}/\text{cm}$). Het afvullen gebeurt van onder naar boven, waarbij de vulpijp steeds zover naar boven getrokken wordt dat de uitstroomopening onder het niveau van het al aangebrachte groutmengsel blijft. Bij zeer diepe boorgaten kan het terugtrekken van de vulpijp problematisch zijn, dan kunnen twee vulpijpen worden toegepast: één diepe die in het boorgat blijft en waarmee het boorgat tot ongeveer de helft wordt opgevuld en een tweede pijp die tot de helft van het boorgat is ingebracht en kan worden teruggetrokken. Totale volume (m^3) verwerkte grout en totale hoeveelheid gebruikte vaste delen (kg, per component) wordt per boorgat gedocumenteerd.

Van de bovenomschreven werkwijze kan worden afgeweken indien:

- De bodemwarmtewisselaar volledig in één watervoerende laag wordt geplaatst. Dan kan het boorgat worden opgevuld met fijn zand of grind (mediaan $350 - 1500 \mu\text{m}$). Daarbij moet erop worden toegezien dat de grofheid van het gebruikte materiaal zodanig is dat voldoende valsnelheid wordt verkregen, het gebruik van fijn materiaal dient te worden voorkomen. Het aanbrengen kan plaatsvinden door een vulpijp en gebeurt in etappes van ongeveer 25 meter, waarbij tussen elke etappe voldoende tijd wordt gegund om te bezinken (circa 10 - 15 minuten).
- Tijdens de boring de diepte van de scheidende lagen voldoende nauwkeurig kan worden vastgesteld en de diepte van de aan te brengen kleistop goed kan worden vastgesteld. De kleistop wordt met een overlengte van minimaal 3 meter onder en boven de scheidende laag aangebracht. Andere trajecten worden aangevuld met grind of zand. De elektrische geleiding van het grondwater is $< 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Bij geboorde wisselaars worden de bovenste 5 meter (of tot 3 meter beneden de heersende freatische grondwaterspiegel) afgedicht met bentoniet. Dit om mogelijke inzijging langs de warmtewisselaar van vloeistoffen vanaf het oppervlak naar diepere bodemlagen te voorkomen. Voor gedrukte wisselaars, waarbij de overdiameter van het sondeergat niet groter is dan 0,03 m, wordt een afdichting weliswaar geadviseerd, maar niet noodzakelijk geacht. Alleen in uitzonderlijke gevallen en bij een overdiameter groter dan 0,03 m kan een afdichting van de bovenste meters noodzakelijk zijn. De uitvoerder staat ten alle tijden garant voor de kwaliteit van de afwerking van de warmtewisselaar.

4.4 Horizontaal aansluitwerk

Cunetten moeten van voldoende breedte en diepte zijn, waarbij stabiliteit van de wanden van belang is. Cunetten moeten bij voorkeur vrij zijn van water en voorzien van een zandbed van minimaal 0,15 m alvorens wordt aangevangen met het aanbrengen van horizontale leidingen. Bij voorkeur moeten de lusbenen en concentrische verticale leidingen van de verticale wisselaars zich in het midden van de sleuf bevinden

Het cunet dient van de gevel af naar het verst verwijderde punt te verdiepen (afschot circa 0,001 - 0,005 m/m). Bij lange aanlooplengtes, of in situaties waar niet voldoende afschot kan worden aangehouden, moet bij de verticale wisselaars in een onluchtungskelder of -put worden voorzien. Waar de aansluitingen van de verticale wisselaars op de horizontale leidingdelen plaatsvindt wordt het cunet zodanig verdiept dat de te maken verbinding op voldoende diepte kan worden aangebracht. In verband met ontluchten mag de kop van de VBWW niet hoger liggen dan de horizontale leidingen.

4.4.1 Horizontale leidingen

Het materiaal van de horizontale leidingen is Polyethyleenbuis, minimaal MDPE – PE100 (voor bedrijfstemperatuur tot maximaal 50 °C), PN8. Stijfheidsklasse is SN8 of gelijkwaardig (bestand tegen uitwendige-overdruk van 5 bar). Het gebruikte PE materiaal is conform KIWA BRL-K-533/02 of gelijkwaardige norm (bijvoorbeeld SN218-306) gefabriceerd, en is gemerkt (typeaanduiding, fabricagedatum, drukklasse, wanddikte).

Bij aanvoer van het materiaal wordt ervoor zorggedragen dat het materiaal schoon en onbeschadigd is. Leidingen worden voor gebruik visueel geïnspecteerd.

Horizontale leidingen worden worden aangebracht op een diepte van minimaal 0,8 m –mv, op een geschikt bedmateriaal (bij voorkeur zand). Aanvoer- en retourleidingen worden op een minimale afstand van 0,3 - 0,5 m gelegd. Over de leidingen worden de cunetten eerst met minimaal 0,3 m zand aangevuld, verder wordt aangevuld met een geschikt materiaal (niet puinhoudend of stenig) en voldoende verdicht, rekening houdende met het eindgebruik. Bochten in de leidingen hebben een buigstraal van minimaal 35 x de buisdiameter.

Bij het bepalen van de positie van de horizontale leidingen wordt rekening gehouden met het mogelijke gebruik, zoals bestrating, mogelijke afschutting e.d. De posities van de horizontale leidingdelen in de sleuf worden gemarkeerd en op een kaart aangetekend. Posities van de aansluitingen op de verticale wisselaars worden aangetekend.

De verticale warmtewisselaars worden parallel aangesloten op een horizontale leiding naar een verdeler. Wanneer meerdere verticale wisselaars op een horizontaal circuit wordt aangesloten wordt een Tichelmann-schakeling toegepast. De verschillen in totale leidinglengte tussen de individuele stroombanen dient minder te zijn dan 10%.

4.4.2 Verbindingen

Over het algemeen worden in het veld verbindingen aangebracht tussen de horizontale leidingen en de verticale warmtewisselaars. Soms zijn ook verbindingen in het horizontale leidingdeel zelf nodig, maar het is beter deze zoveel mogelijk te vermijden. In de huidige praktijk worden verbindingen gemaakt door middel van een lastechniek.

PE leidingen kunnen worden gelast volgens een stuiklas principe (NEN 7200), echter voor een installatie van de horizontale leidingen van een verticaal bodemwarmte-wisselaarsysteem wordt deze methode niet aanbevolen, aangezien het nagenoeg onmogelijk is de noodzakelijke randvoorwaarden voor een goede las te waarborgen. Aansluitingen worden dan ook met name door middel van elektrolasmoffen uitgevoerd. Voor het uitvoeren van elektrolasmoffen is er over het algemeen een montagerichtlijn van de leverancier van de moffen en lasapparatuur (bijvoorbeeld [42]; [43]). De belangrijkste eisen voor een goede lasverbinding zijn:

1. Goede kwaliteit lasapparatuur, periodiek gekeurd.
2. Goed (recht) afgewerkte en schone buiseinden. Buiseinden worden geschild of geschraapt.
3. Oppervlak van buisuiteinde en lasmoffen wordt goed ontvet. Gebruik voor het reinigen geen materiaal dat pluizen kan achterlaten. Gebruik steeds schoon reinigingsmateriaal.
4. Buiseinden worden op juiste insteekdiepte gebracht, deze wordt gecontroleerd.
5. De schone en droge buisuiteinden worden samengevoegd en spanningsvrij gefixeerd.
6. Lassen plaatsen in rechte leidingdelen, gebruik van lasmoffen in bochten wordt vermeden.
7. Las wordt conform gebruiksaanwijzing apparatuur opgevolgd.
8. Voldoende afkoeltijd gunnen (minimaal 30 minuten).

5 Testen en opleveren

Het bodemwarmtewisselaarsysteem wordt voor oplevering onderworpen aan een mechanische sterktest, een dichtheidsbeproeving en een debiet test. In opdracht van de NOVEM is een beproevingsprotocol opgesteld [44] terwijl ook de WAVIN [45] een procedure geeft voor het afpersen van leidingen. Met name de in deze rapporten beschreven mechanische sterktest is van een zodanige lengte dat ze meestal niet in de praktijk (van een woningbouwproject) uitgevoerd kan worden. Deze protocollen schrijven ook voor dat deze test pas uitgevoerd kan worden nadat de grond rond het leidingstelsel voldoende gezet is. Daarbij moet worden aangetekend dat deze mechanische sterkte test is ontworpen voor gebruik onder de bedrijfsdruk als water- of gas persdrukleiding. In de praktijk blijkt voor een VBWW-systeem met een overdruk van 2 – 3 bar, een aangepast beproevingsprotocol, zoals hieronder omschreven, goed te voldoen.

Naast het testen is het doorspoelen van het systeem alvorens het af te vullen van belang. Verontreinigingen in het leidingwerk kunnen op termijn voor grote problemen zorgen. Verontreinigingen kunnen hun oorsprong vinden in onvoldoende zorgvuldigheid tijdens de aanleg en het als gevolg daarvan achterblijven van deeltjes (papier, textiel, stof, PE-schaafsel, zand, grind etc.) in het leidingstelsel. Daarnaast kan verontreiniging van de leiding optreden als gevolg van neerslag van stoffen uit het circulatiemedium, vaak als een film aan de binnenzijde van de leidingen. Effecten van deze verontreinigingen kunnen zijn: optreden van blokkage, stimuleren van corrosie van metalen delen (warmte-wisselaar, warmtepomp) of stimuleren van bacteriegroei. Bij VBWW's, wanneer opgebouwd uit kunststof, is corrosie geen probleem. De belangrijkste vormen van verontreinigingen zijn:

- Vuil achtergebleven tijdens installatie.
- Aanslag als gevolg van neerslag van in het water opgeloste stoffen (precipitatie) zoals Calcium, Magnesium en ijzer-zouten (calcium carbonaat, calcium-sulfaat, magnesium-carbonaat of magnesium-silicaat) zijn de meest voorkomende vormen van aanslag. Precipitatie is een gevolg van veranderende temperatuur en pH. De kwaliteit van het water heeft een groot effect op de kans op het optreden van neerslag: zacht water heeft minder risico in vergelijking tot hard water.
- Corrosie, treedt alleen bij metalen delen op. Twee vormen kunnen worden onderscheiden: corrosie als gevolg van een elektrolytische reactie van metaaldelen met zuurstof en waterstof uit het water, en corrosie als gevolg van anaerobe bacteriën zoals sulfaat reducerende bacteriën.
- Bacteriële verontreiniging. Treedt op als gevolg van gebruik van verontreinigd water of introductie van bacteriële verontreiniging tijdens installatie. Deze vorm van verontreiniging treedt vrij frequent op en is moeilijk te voorspellen. De grootste kans op bacteriële verontreiniging wordt gevonden bij systemen die afgevuld zijn, maar vervolgens gedurende een langere periode niet in gebruik zijn en bij systemen die gevuld en daarna weer afgetapt zijn. Onder die omstandigheden kan zich snel een biofilm afzetten op de binnenzijde van leidingen. Alhoewel vele soorten bacteriën voor problemen kunnen zorgen wordt heden ten dage met name de aanwezigheid in significante hoeveelheden van *Pseudomonas* als indicator voor de biologische kwaliteit van het water gebruikt. De belangrijkste problemen zijn het ontstaan van slib, leidend tot blokkage van leidingen, en ontgassing.

Bij de evaluatie van de risico's moet rekening gehouden worden met het feit dat bij systemen waar gebruik wordt gemaakt van vrije koeling er menging tussen de VBWW en het gebouwstelsel kan optreden. Bij grotere systemen is het van belang een voorziening te hebben waar van het circulatiemedium monsters genomen kunnen worden en waar uitgespoelde

verontreinigingen kunnen bezinken en worden verwijderd. Deze voorziening zal over het algemeen met de verdelers geïntegreerd zijn.

Met betrekking tot het spoelen en ontsmetten van het leidingsysteem is de referentie de KIWA (KIWA, SWE 99.009) en BSRIA ¹⁷ [46]. Van belang hierbij is het vaststellen van de minimaal te bereiken stroomsnelheid in de verticale lussen, dat wil zeggen een snelheid waarbij mogelijke verontreinigingen als zand- of grinddeeltjes worden uitgespoeld.

5.1 Voorspoelen en afvullen

Bij het voorspoelen is het nodig de stroomsnelheid zo groot te maken dat deze groter is dan de eindsnelheid van een deeltje in suspensie. Bij de in VBWW's optredende Reynoldsgetallen kan deze eindsnelheid benaderd worden door [39]:

$$v_e = \sqrt{\frac{4gd(\rho_g\rho_f)}{3C_D\rho_f}} \text{ ms}^{-1}$$

Waar:

v_e : Eindsnelheid vloeistof t.o.v. deeltje (ms^{-1}).

g : Versnelling o.i.v. de zwaartekracht ($9,81 \text{ ms}^{-1}$).

d : Diameter deeltje (m).

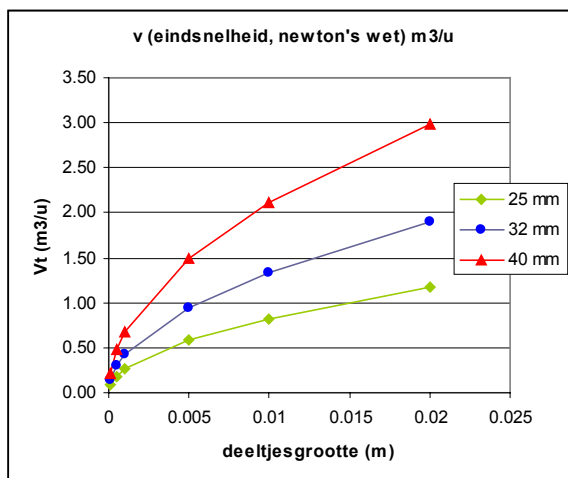
ρ_g : Dichtheid deeltje (kgm^{-3}).

ρ_f : Dichtheid vloeistof (kgm^{-3}).

C_D : Wrijvingscoëfficiënt deeltje.

De wrijvingscoëfficiënt C_D hangt daarbij af van de vorm van het deeltje en het Reynolds getal. Voor $500 < \text{Reynolds} < 10^5$ is C_D van een glad en rond deeltje ongeveer gelijk aan $0,44 - 0,5$. Figuur 6 geeft bij die aannamen het minimale debiet voor verschillende leidingdiameters (voor de annulus van een concentrische warmtewisselaar kan de hydraulische diameter worden gebruikt) bij een $C_D = 0,44$ en de eigenschappen van water bij 10°C .

Figuur 6. Eindsnelheid diverse deeltjes-diameters voor drie leidingdiameters, voor de annulus van een concentrische warmtewisselaar kan de hydraulische diameter worden gebruikt.



¹⁷ Building Services Research & Information Association

Om de meest voorkomende deeltjes, met een maximale diameter van 0,005 – 0,01 m (5 – 10 mm), uit te spoelen is een debiet van minimaal 1 m³uur⁻¹ (25 mm lus) of 2,5 m³uur⁻¹ (40 mm lus) noodzakelijk.

Na het voorspoelen wordt het systeem afgevuld met het voorgeschreven circuliatiemedium. Het medium wordt vooraf gemengd en vervolgens in het wisselaarsysteem gebracht. Daarbij wordt het in het wisselaarsysteem aanwezige water afgevoerd, of wordt dit bovengronds in een mengtank bijgemengd (rekening houdende met het benodigde volume glycol). Het systeem wordt vervolgens verzegeld zodat er geen verontreinigingen kunnen worden geïntroduceerd.

Voor inwerking stellen van het systeem wordt een monster van het circuliatiemedium getest op het voorkomen van *Pseudomonas* en op de aanwezigheid van sulfaat reducerende bacteriën. Bij grote gedistribueerde systemen (woningbouw) wordt random één op de tien systemen getest. Indien een verontreiniging wordt aangetroffen worden vervolgens alle systemen getest. De kwaliteit van het medium is voldoende bij een TTL (Totaal telling Levensvatbaar) bij 22 °C en 38 °C ≤ 10000 kve (kolonie vormende eenheden) per ml, *Pseudomonas* ≤ 10 kve/ml en afwezigheid van sulfaat reducerende bacteriën.

5.2 Dichtheidstest

De verticale wisselaars zijn vooraf, fabrieksmatig, getest (U-lussen) en onder druk ingebracht. Na installatie in de bodem dient het systeem echter ten allen tijde aan een dichtheidstest onderworpen te worden. Bij grote systemen (> 10 verticale wisselaars) is het aan te bevelen individuele wisselaars te testen voordat ze op de horizontale leidingen worden aangesloten, aangezien het opsporen van eventuele lekkages daarmee eenvoudiger is.

De dichtheidsbeproeving wordt uitgevoerd op elke individuele parrallele set wisselaars, inclusief horizontale leidingen. Voor de test wordt het systeem voorgespoeld en wordt het debiet gecontroleerd, het systeem mag geen verstoppingen vertonen. De dichtheidsbeproeving geschiedt als volgt:

1. Dichtheidsbeproeving op een inwendige druk van ca. 0,05 MPa (0,5 bar). Hierbij worden lekkages in foutief gemonteerde verbindingen eerder opgespoord dan bij hoge druk (waarbij de lus tegen de mof dichtgedrukt kan worden). Het systeem wordt visueel geïnspecteerd.
2. Wanneer na 1 uur een maximale drukvermindering van minder dan 0,01 Mpa (0,1 bar) is geconstateerd, dan wordt de druk opgevoerd tot de bedrijfsdruk. Aangezien de bedrijfsdruk normaal gesproken ongeveer 0,2 – 0,3 Mpa (2 – 3 bar) bedraagt wordt de druk in twee stappen van 30 minuten opgevoerd.
3. Het systeem wordt visueel geïnspecteerd. Wanneer na 1 uur een maximale drukvermindering van minder dan 0,01 Mpa (0,1 bar) is geconstateerd dan is de leiding dicht en kan het systeem op sterkte beproefd worden.

5.3 Mechanische test

De mechanische sterktetest is met name bedoeld om mogelijk slechte lassen in de verbindingen of ernstig beschadigde leidingen op te sporen. De WAVIN [48] schrijft een test voor op 1,5 maal de drukklasse, maar deze test mag slechts dan worden uitgevoerd nadat de cunetten zijn opgevuld en voldoende verdicht. Praktijkproeven (Groenholland, niet gepubliceerd) hebben uitgewezen dat een slechte las of beschadigde leiding goed kan worden opgespoord bij een druk gelijk aan of iets lager dan de drukklasse. De sterktetest wordt uitgevoerd bij minimaal 80% van de drukklasse, gedurende een uur mag de druk niet meer dan 10% dalen.

5.4 Oplevering

Het bodemwarmtewisselaarsysteem wordt onder druk opgeleverd. Bij de oplevering wordt de documentatie van het systeem overgedragen. De oplevering kan een functietest omvatten waarbij de temperatuurrepons in het systeem (minimaal $T_{\text{bodem-in}}$, $T_{\text{bodem-uit}}$ en vermogen) gedurende een bepaalde periode wordt gemeten.

Deze documentatie omvat minimaal een rapportage van de in §3.1 genoemde aandachtspunten. Voor een beperkt systeem wordt de dimensionering van het VBWW systeem tenminste kort toegelicht met behulp van een globale beschrijving van de bodemopbouw (bodemtypering), energievraag object. Voor een nominaal systeem zal een uitgebreide rapportage met betrekking tot het ontwerp beschikbaar zijn.

Naast de documentatie met betrekking tot het ontwerp worden overdrachtformulieren ingevuld en, indien nodig, getekend. Een voorbeeld voor de overdrachtsformulieren wordt in Bijlage IV gegeven.

5.5 Administratieve aandachtspunten

Zeer wezenlijk is het hanteren van afgestemde en ter zake relevante leveringsvoorwaarden, waarin duidelijk uitgewerkt is wie wat levert, welke uitgangspunten voor het ontwerp zijn gehanteerd, en welke garantievoorwaarden worden geboden. Deze garantievoorwaarden dienen zowel het mechanische functioneren (mogelijke lekkage of andere calamiteiten) als het thermisch functioneren, binnen de tijdens het ontwerp gestelde randvoorwaarden, te garanderen.

5.6 Nazorg

Gesloten bodemwarmtewisselaarsystemen zijn, indien goed gedimensioneerd en aangelegd, nagenoeg onderhoudsvrij. Normaal gesproken zal daarom geen nazorg nodig zijn. Hierop kan één uitzondering worden gemaakt: wanneer een antivriesmengsel als circulatiemedium wordt toegepast is het aan te bevelen om bijvoorbeeld tweejaarlijks het antivriesgehalte te controleren en zo nodig aan te vullen. Controle kan worden uitgevoerd met behulp van een voldoende nauwkeurige dichtheidsbepaling of een vriespuntsbepaling.

Literatuur

- [1] Ministerie van Economische Zaken, 1996. Derde Energienota. *SDU Uitgeverij, Den Haag*.
- [2] Ministerie van Economische Zaken, 1997. Duurzame energie in opmars. Actieprogramma 1997-2000. *Brief van de Minister van Economische Zaken aan de Tweede Kamer*.
- [3] Novem, Het CO₂ reductieplan. <http://www.co2-reductie.nl/>.
- [4] Convenant Warmtepomp Systemen in de Woningbouw, 2000. Convenant Warmtepomp Systemen in de Woningbouw, de stap naar een effectief gebruik van omgevingsenergie.
- [5] Willemsen, A. & Koenders, M.J.B., 2002. Milieueffecten en –Afweging, Fase I. Bepaling van de milieueffecten van grondwatersystemen en bodemwarmtewisselaars. *Novem, IF Technology 1/50197/GW*.
- [6] Oostendorp, P.A., Juffermans, P.C.W. & Oostewaard, A.J. van. 1999. De concurrentiekracht van warmtepompen in Nederland. *TNO rapport TNO-MEP-R 99/528*.
- [7] NVOE 2002. NVOE-richtlijnen Ondergrondse Energieopslag. NVOE/NOVEM.
- [8] Verein Deutche Ingenieure, 2000. Thermische Nutzung des Untergrundes: Blatt 1 – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Blatt 2 – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Blatt 3 – Untererdische Thermische Energiespeicher. *VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI 4640*.
- [9] Kavanaugh, S.P. & K. Rafferty, 1997. Ground-Source Heat Pumps, Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. *American Association of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [10] Adragna, M., Coyle, S., Foley, C., Hawryn, S., Martin, A. & McConnell, J. (eds), 2002. CSA Standard C448-Series 2: Design and Installation of Earth Energy Systems. *Canadian Standards Association*.
- [11] Gons, J., Naaktgeboren, A.J., Holloway, L.R., Klinkenberg, W. & Louw, R. 1995. 35 jaar PVC-waterleiding in Nederland. *H₂O 28(8) 264 – 268*.
- [12] Paksoy, H. & Evliya, H. (Eds). 2001. Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage. Annual Report 2000. *OECD/IEA Committee on Energy Research and Technology End-Use Working Party*.
- [13] EGB. 2002. Reglement Erkenningsregeing EGB. *Stichting erkenning voor het Grondboor- en bronbemaalingsbedrijf*.
- [14] CKB. 2000. Certificatieregeling Kabelinfrastructuur Buizenlegbedrijven. *Stichting CKB*.
- [15] Rosenthal-Koehorst, I.H.A. & Willemsen, A. 2000. Wet- en regelgeving bij duurzame energiesystemen in de bodem (opslag, zon, warmtepomp en asfalt). en analyse knelpunten vergunningverlening kleine warmtepompprojecten. *Novem, IF Technology, Novem rapportage 2WPUB00.01*.
- [16] Rosén, B., Gabrielsson, A., Fallsvik, J., Hellström, G. & Nilsson, G. 2001. System för värme och kyla ur mark – En nulägsbeskrivning. *SIG Statens Geotekniska Institut, Varia 511, Linköping*.
- [17] Klein, S. A., Duffie, J.A., and Beckman, W.A., 1976. TRNSYS - A Transient Simulation Program, *ASHRAE Trans, 82, 623*.

- [18] BLAST. 1986. Building loads and system thermodynamics. *University of Illinois, Urbana-Champaign*.
- [19] ESP-r: A Building and Plant Energy Simulation Environment, User Guide Version 9 Series. *ESRU Publication, University of Strathclyde, Glasgow*.
- [20] Dienst grondwaterverkenning TNO. Grondwaterkaart van Nederland.
- [21] Rijks Geologische Dienst, 1975. Geologische overzichtskaarten van Nederland (met toelichting). *Haarlem*.
- [22] Witte, H.J.L., A.J. van Gelder, J.D. Spitler. 2002. In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: The Dutch Perspective. *ASHRAE Transactions, 108(1)*.
- [23] Van Haneghem, I.A., 1981. Een niet-stationaire naaldmethode (warmtegeleiding, warmtecapaciteit, contactweerstand). *Thesis, University of Wageningen, 187 pp*.
- [24] Witte, H.J.L. 2001. Geothermal Response Tests with heat extraction and heat injection: Application in research and design of Geothermal Ground Heat Exchangers. *Europäischer Workshop européen sur / über Test de Réponse Géothermique Geothermische Response Tests EPFL, Lausanne*.
- [25] Serrão, M. 2002. Toepassing Bentoniet in de ondergrond van Nederland. Intern Rapport Groenholland, Amsterdam.
- [26] Claesson, J., Efring, .B, Eskilson, P. & Hellström, G. 1985. Markvärme – En handbok om termiska analyser. *Bygghökningsrådet T-skrift T16-18:1985*.
- [27] Eskilson, P. 1987. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. *Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden. Department of Mathematical Physics. 264 pp*.
- [28] Hellström, G. 1991. Ground heat storage, Thermal analysis of duct storage systems: Part I. *Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden. Department of Mathematical Physics. 262 pp*.
- [29] Nordell, B. 1993. Borehole heat Store Design Optimisation. *Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering, Division of Water Resources Engineering.1994:137D*.
- [30] Janssen, P., Meijerink, M., Rikken, M., Swartjes, F., Posthumus, R., Crommentuyn, T. & van Plassche, E. Ad-hoc advies ethanol. RIVM Centrum voor stoffen en risicobeoordeling.
- [31] Janssen, P., Meijerink, M., Rikken, M., Swartjes, F., Posthumus, R., Crommentuyn, T. & van Plassche, E. Ad-hoc advies propyleenglycol. RIVM Centrum voor stoffen en risicobeoordeling.
- [32] Ingersoll, L.R., Zobel, O.J. and A.C. Ingersoll, 1948. Heat conduction with engineering, Geological and other applications. *New York: McGraw-Hill, 278 pp*.
- [33] Guernsey, E.N., betz, P.L. & Skan, N.H. 1949. Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. *ASHRE Trans 55:321 – 344*.
- [34] Eskilson, P., Hellström, G., Claesson, J., Bolomberg, T. & Sanner, B. 2000. Earth Energy Designer - EED verion 2.0.
- [35] Spitler, J.D. 2000. GLHEPRO - A design tool for commercial building ground loop heat exchangers.
- [36] Huber, A., Schuler, O. & D. Pahud. 1999. Erweiterung de programms für Erdwärmesondenfelder.

- [37] Shonder, J A., J.V. Beck. 1999. Determining effective soil formation thermal properties from field data using a parameter estimation technique. *ASHRAE Transactions*. 105(1):458-466.
- [38] Witte, H.J.L., A.J. van Gelder & Serrão, M. 2002. Comparison of design and operation of a Commercial UK Ground source heat pump project. *SET 2002, 1st International Conference on Sustainable Energy Technologies 12-14 June 2002, Porto, Portugal*.
- [39] Evett, J.B. & Liu Cheng. 1987, Fundamentals of Fluid Mechanics. *McGraw-Hill Civil Engineering Series*. 416 pp.
- [40] Schmitz, N. 2000. SF Pressure Drop 5.0 for Windows 95/98/NT.
- [41] Marktonderzoek grondboorbedrijven. *Novem, Ingenieursbureau het Noorden, Novem rapportage 345103-1023*.
- [42] WAVIN. 1994. Montagerichtlijn Rollmaplast.
- [43] GEORG FISCHER. Anwendungstechnik PE.
- [44] Beproevingprotocol verticale bodemwarmtewisselaarsystemen (beproeving, oplevering en onderhoud). *Novem 345104.0808, IF Technology/Groenholland*.
- [45] WAVIN. 1992. Waterleidingen en rioolpersleidingen, Handboek uitgave 1992.
- [46] Parsloe, C.J. 2001. pre-commission cleaning of pipework systems. *BSRIA Application Guide AG 1/2001*. 62 pp

BIJLAGE I, DEELNEMERS WERKGROEP KWALITEIT

Deelnemer	Organisatie
Arkestijn, K.	ISSO
Beuken, R.M.H.J.	Novem
Draayer, G.	Duratherm
Geelen, C.P.J.M.	TNO-MEP
De Heer, L.	Uneto-VNI
Vos, F.	Uneto-VNI
Janssen	JTS
Penning, A.	DUBO
Schut, C.	ITHO
Timmermans, T.	Westerloo
Travesari, R.	TNO-MEP
Van Alphen, P.R.	Techneco
Van den Berg, B.	AP van den Berg
Van Gelder, A.J.	Groenholland
Van Gijssel, H.	BFB speciale technieken
Van Krevel, A.	Techneco
Van Gulik, L	ITHO
Witte, H.J.L.	Groenholland

BIJLAGE II, QUICK-SCAN: STAND VAN ZAKEN INTERNATIONAAL

Met betrekking tot het uitvoeren van boringen, afwerken van boorgaten, uitvoeren van grondwerkzaamheden, inbrengen van leidingen in de grond, maken van verbindingen tussen leidingen zijn in de verschillende landen diverse wetten, regels en normen van toepassing. Vaak vallen de activiteiten onder “bevoegd gezag” (regionaal of plaatselijk bestuur, milieudienst, waterschap of water-autoriteit) en is regionale of lokale regelgeving van kracht. Regelgeving met betrekking tot werkomstandigheden (Arbo, veiligheidsplan bouwlocaties etc) zijn van toepassing.

Wij beperken ons hier tot regelgeving specifiek voor bodemwarmtewisselaar systemen.

Internationaal – IEA

De IEA¹⁸ heeft, binnen Annex 13, richtlijnen voor het (thermische) ontwerp van bodemgekoppelde energiesystemen in voorbereiding. Ook is een IEA publicatie verschenen over het vaststellen van de milieubelasting van deze systemen [B1].

Internationaal – Europa

Europese normen – de European Committee for Standardization (CEN) heeft een aantal normen voor warmtepompen, maar niet specifiek voor het ontwerp of installatie van gesloten bodemwarmtewisselaarsystemen.

Canada

In Canada is recent (februari 2002) een nieuwe richtlijn verschenen voor het ontwerp en installatie van geo-energie systemen, richtlijn C448 [B2]. Deze richtlijn maakt een onderscheid naar commerciële of institutionele gebouwen en huizen. De richtlijn is bedoeld voor bodemgekoppelde (open zowel als gesloten) warmtepompsystemen, met uitsluiting van directe expansie en zg. “standing column well” systemen. Voor de warmtepomp en het ondergronds te gebruiken materiaal (PE leidingen) zijn er aparte richtlijnen, deze zijn in deze studie niet geëvalueerd. Alle gebruikte leidingmaterialen die in aanraking met grondwater kunnen komen moeten niet-metallisch zijn.

USA

In de Verenigde Staten bestaan verschillende richtlijnen, waaronder nationale standaarden uitgebracht door ORNL¹⁹ [B3] en National Ground Water Association [B4]. Voor milieuaspecten wordt verwezen naar de EPA²⁰. Veel richtlijnen en regelgeving zijn lokaal of per staat geregeld, bijvoorbeeld de ‘Ground Source Heat Pump Manual’ (Pennsylvania, Dep. of Environmental Protection). De ORNL ‘Generic Guide Specification for Geothermal Heat Pump System Installation’ [B3] is zeer uitgebreid (+500 pp), tot op het niveau van de elektrische bedrading. Over werkelijke praktische implementatie of ontwerp wordt weinig informatie gegeven. De NGWA²¹ ‘Guidelines for the Construction of Vertical Boreholes for Closed Loop Heat Pump Systems’ [B4] is veel praktischer gericht. De basis voor het ontwerpen van Ground

¹⁸ International Energy Agency

¹⁹ Oak Ridge National Laboratory

²⁰ Environmental Protection Agency

²¹ National Groundwater Association

Source Heat Pump Systems is de 'Ground Source Heat Pumps, Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings' (ASHRAE²²) [B5].

Zwitserland

Verschillende Zwitserse richtlijnen zijn van toepassing op bodemwarmtewisselaars. Milieuaspecten zijn geregeld middels richtlijnen van de BUWAL²³, technische richtlijnen zijn o.a. AWP²⁴-richtlijnen, BFE²⁵-richtlijnen. Kwaliteit van het uitvoeren van boorwerkzaamheden is geregeld in de FWS/BFE²⁶ richtlijnen, op basis van een certificeringsstelsel. Het leggen van polyethyleen leidingen is geregeld middels richtlijn VKR-RL 02-97d ('Erdverlegte Druckrohrleitungen aus Polyethylen PE80 und PE100'). Met betrekking tot de milieu-aspecten en ontwerp-richtlijnen zijn de Zwitserse richtlijnen met name gebaseerd op de Duitse VDI richtlijnen. Zie ook [B6] voor een overzicht.

Oostenrijk

Verschillende Oostenrijkse normen (zoals ÖNORM M 7753/7755) hebben betrekking op warmtepompen. Daarbij zijn er diverse specifieke normen, bijvoorbeeld voor directe verdamping (ÖNORM M7757/M7763). Oostenrijkse normen met betrekking tot toepassing van bodemwarmte en het gebruik van de ondergrond zijn:

- ÖEWAV RB 207:1993 "Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme (AGE)". Deze norm heeft betrekking op het wettelijke en economische kader van het gebruik van grondwater.
- ÖNORM B 4419-1:1985 "Erd- und Grundbau; Untergründerkundung durch Sondierungen; Rammsondierungen" Deze norm heeft betrekking op het onderzoeken van de ondergrond met behulp van (ram-)sonderingen.
- ÖNORM B 4401-1:1980 "Erd- und Grundbau; Erkundung durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben; Aufschlüsse im Lockergestein". Norm met betrekking tot het uitvoeren van onderzoek aan de ondergrond op basis van sleuven of boringen en het nemen van monsters uit de ondergrond.

Spanje

Heeft verschillende normen voor warmtepompen en voor het uitvoeren van grondwerk (o.a. ook injecteren), maar niet specifiek voor het ontwerp of installatie van gesloten bodemwarmtewisselaarsystemen.

Scandinavië (Zweden)

In Zweden zijn nog geen wettelijke richtlijnen van kracht. Het Zweedse Geotechnische Instituut SGI²⁷ heeft recentelijk een rapport uitgebracht [B7] waarin een uitgebreid overzicht wordt gegeven van de toepassing van bodemwarmte en wordt ingegaan op de technische randvoorwaarden voor een effectief systeem.

²² American Association of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

²³ Bundesamt für Wald und Landschaft

²⁴ Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen

²⁵ Bundesamt für Energie

²⁶ Foedergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz

²⁷ Statens Geotekniska Institut

Duistland

In Duitsland is de VDI (Verein Deutscher Ingenieure) richtlijn [B6] opgesteld (VDI4640). Deze richtlijn gaat uitgebreid in op het ontwerp en de installatie van geo-energiesystemen waaronder grondwatersystemen, verticale en horizontale warmtewisselaarsystemen. Aan de orde komen o.a. principes en achtergronden, benodigde vergunningen, veiligheidsvoorschriften voor de warmtepomp, locatie beschrijving, milieu aspecten, materiaalkeuze, ontwerp van verschillende systemen uitgesplitst in kleine en grote, ondiepe en diepe systemen etc. De richtlijn geeft veel achtergrondinformatie en technische specificaties. Een overzicht van de van toepassing zijnde DIN en andere normen wordt gegeven. Een nieuwe uitgave is in voorbereiding (wordt medio 2003 verwacht).

Frankrijk

Heeft verschillende normen voor warmtepompen en voor het uitvoeren van grondwerk (o.a. ook injecteren), maar niet specifiek voor het ontwerp of installatie van gesloten bodemwarmtewisselaarsystemen.

Overigen

Van de volgende landen is wel informatie opgevraagd (veelal bij de nationale standaardisatie instituten), maar is geen informatie specifiek van toepassing op verticale bodemwarmtewisselaars gevonden: Noorwegen, Groot Britannië, Ierland, België, Denemarken en Italië, CEN Europese normen.

Literatuur

- [B1] Morofsky, E. & Cruickshanks, F. 1997. Underground Thermal Energy Storage: Procedures for Environmental Impact Assessment. *PERD/ECES/IEA, Energy Conservation through Energy Storage, Annex 8 Working Report.*
- [B2] Adragna, M., Coyle, S., Foley, C., Hawryn, S., Martin, A. & McConnel, J. (eds), 2002. CSA Standard C448-Series 2: Design and Installation of Earth Energy Systems. *Canadian Standards Association.*
- [B3] Thomas, W. & Madgett, M. 2000. Generic Guide Specification for Geothermal Heat Pump System Installation. *Oak Ridge National Laboratory Rapport ORNL/TM-2000/132.*
- [B4] McGray, K.B (ed). 1997. Guidelines for the Construction of Vertical Boreholes for Closed Loop heat Pump Systems. *National Ground Water Association, Ohio.*
- [B5] Kavanaugh, S.P. & K. Rafferty, 1997. Ground-Source Heat Pumps, Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. *American Association of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.*
- [B6] Verein Deutche Ingenieure, 2000. Thermische Nutzung des Untergrundes: Blatt 1 – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Blatt 2 – Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, Blatt 3 – Untererdische Thermische Energiespeicher. *VDI-Gesellschaft Energietechnik, VDI 4640.*
- [B7] Rosén, B., Gabrielsson, A., Fallsvik, J., Hellström, G. & Nilsson, G. 2001. System för värme och kyla ur mark – En nulägesbeskrivning. *SIG Statens Geotekniska Institut, Varia 511, Linköping*

BIJLAGE III, MEDIUM EIGENSCHAPPEN

Mediumeigenschappen water, bij verschillende mediumtemperaturen.

T	Dichtheid (kg/m ³)	Warmtecapaciteit (J/kgK)	Warmtegeleiding (W/mK)	Viscositeit (mPa.s)	Vriespunt (°C)
0	999,8	4217	0,562	1,791	0,00
5	1000,0	4202	0,572	1,520	0,00
10	999,8	4192	0,582	1,308	0,00
15	999,2	4186	0,591	1,139	0,00
20	998,3	4182	0,600	1,003	0,00
25	997,2	4180	0,608	0,891	0,00
30	995,8	4178	0,615	0,798	0,00
35	994,1	4178	0,622	0,720	0,00
40	992,3	4179	0,629	0,653	0,00
45	990,3	4180	0,635	0,596	0,00
50	988,1	4181	0,640	0,547	0,00

Mediumeigenschappen monopropyleenglycol, bij verschillende mengverhoudingen en mediumtemperaturen.

Volume %	T (°C)	Dichtheid (kg/m ³)	Warmtecapaciteit (J/kgK)	Warmtegeleiding (W/mK)	Viscositeit (mPa.s)	Vriespunt (°C)
15%	-5	1021,7	3987	0,481	3,78	-5,00
15%	0	1020,4	3996	0,489	3,10	-5,00
15%	5	1019,1	4005	0,498	2,58	-5,00
15%	10	1017,6	4015	0,506	2,18	-5,00
15%	15	1015,9	4024	0,513	1,87	-5,00
15%	20	1014,2	4033	0,520	1,62	-5,00
15%	25	1012,3	4043	0,527	1,42	-5,00
15%	30	1010,3	4052	0,533	1,25	-5,00
15%	35	1008,2	4061	0,539	1,11	-5,00

Mediameigenschappen monopropyleenglycol - vervolg

20%	-7	1027,9	3925	0,457	5,23	-7,00
20%	-5	1027,4	3930	0,460	4,79	-7,00
20%	0	1026,0	3940	0,468	3,89	-7,00
20%	5	1024,5	3951	0,476	3,20	-7,00
20%	10	1022,9	3962	0,483	2,68	-7,00
20%	15	1021,1	3972	0,490	2,27	-7,00
20%	20	1019,2	3983	0,496	1,94	-7,00
20%	25	1017,2	3994	0,502	1,68	-7,00
20%	30	1015,1	4004	0,508	1,47	-7,00
20%	35	1012,9	4015	0,513	1,30	-7,00
25%	-9,3	1033,9	3857	0,434	7,27	-9,00
25%	-5	1032,7	3867	0,441	6,01	-9,00
25%	0	1031,2	3879	0,448	4,87	-9,00
25%	5	1029,6	3891	0,455	4,00	-9,00
25%	10	1027,8	3903	0,461	3,31	-9,00
25%	15	1025,9	3915	0,467	2,78	-9,00
25%	20	1023,9	3928	0,473	2,30	-9,00
25%	25	1021,8	3940	0,479	2,02	-9,00
25%	30	1019,5	3952	0,484	1,74	-9,00
30%	-10	1039,2	3787	0,415	10,45	-12,1
30%	-5	1037,7	3810	0,422	8,14	-12,1
30%	0	1036,0	3813	0,428	6,43	-12,1
30%	5	1034,3	3827	0,434	5,16	-12,1
30%	10	1032,4	3840	0,440	4,19	-12,1
30%	15	1030,4	3854	0,446	3,45	-12,1
30%	20	1028,3	3867	0,451	2,88	-12,1
30%	25	1026,0	3880	0,456	2,43	-12,1
30%	30	1023,7	3894	0,461	2,08	-12,1
30%	35	1021,1	3907	0,470	1,79	-12,1
35%	-10	1043,9	3713	0,398	15,82	-15,5
35%	-5	1042,3	3728	0,4304	11,67	-15,5
35%	0	1044,6	3742	0,10	8,82	-15,5
35%	5	1038,7	3757	0,415	6,82	-15,5
35%	10	1036,7	3772	0,420	5,38	-15,5
35%	15	1034,6	3787	0,423	4,32	-15,5
35%	20	1032,3	3801	0,430	3,53	-15,5
35%	25	1030,0	3816	0,434	2,93	-15,5
35%	30	1027,4	3831	0,438	2,46	-15,5
35%	35	1024,8	3845	0,442	2,10	-15,5
35%	40	1022,0	3860	0,446	1,81	-15,5
35%	45	1019,2	3875	0,450	1,57	-15,5
35%	50	1016,1	3889	0,452	1,38	-15,5

Mediumeigenschappen ethyleenglycol, bij verschillende mengverhoudingen en mediumtemperaturen.

Volume %	T (°C)	Dichtheid (kg/m ³)	Warmtecapaciteit (J/kgK)	Warmtegeleiding (W/mK)	Viscositeit (mPa.s)	Vriespunt (oC)
15%	-5	1028,4	3856	0,484	3,02	-5,70
15%	0	1027,3	3866	0,493	2,50	-5,70
15%	5	1026,1	3876	0,502	2,11	-5,70
15%	10	1024,7	3886	0,510	1,82	-5,70
15%	15	1023,3	3896	0,518	1,58	-5,70
15%	20	1021,7	3906	0,525	1,39	-5,70
15%	25	1020,0	3916	0,532	1,24	-5,70
15%	30	1018,1	3926	0,538	1,11	-5,70
15%	35	1016,2	3936	0,545	1,00	-5,70
15%	40	1014,1	3946	0,550	0,91	-5,70
15%	45	1011,9	3956	0,556	0,83	-5,70
15%	50	1009,6	3966	0,561	0,77	-5,70
20%	-10	1037,2	3767	0,460	4,09	-8,10
20%	-5	1036,5	3774	0,465	3,58	-8,10
20%	0	1035,4	3785	0,473	2,94	-8,10
20%	5	1034,1	3796	0,481	2,47	-8,10
20%	10	1032,7	3808	0,489	2,11	-8,10
20%	15	1031,1	3819	0,496	1,83	-8,10
20%	20	1029,5	3830	0,503	1,60	-8,10
20%	25	1027,8	3841	0,509	1,42	-8,10
20%	30	1025,8	3853	0,515	1,27	-8,10
20%	35	1023,8	3864	0,521	1,14	-8,10
20%	40	1021,6	3875	0,526	1,03	-8,10
20%	45	1019,3	3886	0,532	0,94	-8,10
20%	50	1017,0	3897	0,536	0,86	-8,10
25%	-10	1045,5	3677	0,439	4,78	-11,00
25%	-5	1044,4	3689	0,447	3,93	-11,00
25%	0	1043,2	3702	0,455	3,28	-11,00
25%	5	1041,8	3714	0,462	2,78	-11,00
25%	10	1040,8	3727	0,469	2,38	-11,00
25%	15	1038,7	3739	0,476	2,06	-11,00
25%	20	1037,0	3752	0,482	1,80	-11,00
25%	25	1035,1	3764	0,488	1,59	-11,00
25%	30	1033,2	3777	0,493	1,41	-11,00
25%	35	1031,1	3789	0,499	1,26	-11,00
25%	40	1028,9	3802	0,504	1,14	-11,00
25%	45	1026,5	3815	0,508	1,03	-11,00

Mediameigenschappen ethyleenglycol - vervolg

25%	50	1024,1	3827	0,513	0,93	-11,00
30%	-10	1053,2	3589	0,422	5,58	-14,2
30%	-5	1052,0	3662	0,430	4,58	-14,2
30%	0	1050,7	3616	0,437	3,82	-14,2
30%	5	1049,3	3630	0,444	3,22	-14,2
30%	10	1047,7	3644	0,450	2,75	-14,2
30%	15	1046,1	3658	0,456	2,37	-14,2
30%	20	1044,3	3671	0,462	2,06	-14,2
30%	25	1042,4	3685	0,467	1,81	-14,2
30%	30	1040,3	3699	0,473	1,60	-14,2
30%	35	1038,2	3713	0,478	1,42	-14,2
30%	40	1035,9	3727	0,482	1,27	-14,2
30%	45	1033,5	3740	0,487	1,14	-14,2
30%	50	1031,0	3754	0,491	1,03	-14,2
35%	-10	1060,7	3499	0,407	6,69	-17,9
35%	-5	1059,5	3514	0,413	5,6	-17,9
35%	0	1058,1	3529	0,420	4,58	-17,9
35%	5	1056,6	3544	0,426	3,81	-17,9
35%	10	1055,0	3559	0,432	3,22	-17,9
35%	15	1053,2	3572	0,438	2,75	-17,9
35%	20	1051,4	3589	0,443	2,38	-17,9
35%	25	1049,4	3604	0,448	2,07	-17,9
35%	30	1047,3	3619	0,453	1,82	-17,9
35%	35	1045,0	3634	0,457	1,61	-17,9
35%	40	1042,7	3649	0,462	1,44	-17,9
35%	45	1040,2	3664	0,466	1,29	-17,9
35%	50	1037,6	3679	0,469	1,16	-17,9

BIJLAGE IV, OVERDRACHTSFOMULIEREN

1. PROJECTGEGEVENS			
PROJECT			
PROJECTNUMMER			
DATUM		LOCATIE	
OPDRACHTGEVER			
CONTACTPERSOON		TELEFOON	
HOOFDUITVOERDER			
CONTACTPERSOON		TELEFOON	
ACCEPTATIE OPLEVERING			
DRUK BIJ OPLEVERING (BAR)			
PLAATS		DATUM	
HANDTEKENING OPDRACHTGEVER	HANDTEKENING HOOFDUITVOERDER		

2. DIMENSIONERING (ONTWERP) VBWW SYSTEEM				
PROJECT				
PROJECTNUMMER				
UITVOERDER				
CONTACTPERSOON		TELEFOON		
ONTWERPLAST	BASISLAST (MWh)		PIEKLAST (kW en duur)	
	VERWARMING	KOELING	VERWARMING	KOELING
ONTWERPTEMPERATUUR (°C)	JANUARI	AUGUSTUS	JANUARI	AUGUSTUS
ONTWERPDEBIET (M ³ /HR)			DRUKVERLIES (pA)	

3. INSTALLATIE VBWW SYSTEEM						
PROJECT						
PROJECTNUMMER						
DATUM		LOCATIE				
UITVOERDER						
CONTACTPERSOON		TELEFOON				
INBRENGTECHNIEK		<i>Sondeer en/of boorbeschrijving bijgevoegen</i>				
DIAMETER GAT (M)						
EINDDIEPTE (M)						
AFDICHTEN BOVENZIJDE		(M)	SONDEREN		Afdichten Wel / Niet nodig	
AFWERKING, TOTAAL VOLUME (M ³)						
WARMTEWISSELAAR – ULUS		FABRICANT				
TYPE (1U / 2U) - DIEPTE (M)	MATERIAAL (PE80/PE100)	DRUKKLASSE (SDR --; PN --; SN --;)	DIAMETER (M)	WANDDIKTE (M)	AFSTAND HOUDERS (M/M)	
WARMTEWISSELAAR - CONCENTRISCH		FABRICANT				
DIEPTE (M)	MATERIAAL (PE80/PE100)	DRUKKLASSE (SDR --; PN --; SN --;)	UITWENDIG		INWENDIG	
			DIAMETER (M)	WAND DIKTE (M)	DIAMETER (M)	WAND DIKTE (M)

4. HORIZONTALE AANSLUITINGEN			
PROJECT			
PROJECTNUMMER			
DATUM		LOCATIE	
UITVOERDER			
CONTACTPERSOON		TELEFOON	
TYPE SCHAKELING			
MATERIAAL (PE80/PE100)		DRUKKLASSE	
FABRICANT		(SDR --; PN --; SN --;)	
DIAMETER (M)		WANDDIKTE (M)	
LASMOFFEN-TYPE		AANTAL	
LASAPPARATUUR		DATUM KEURING	
LENGTE AAN- EN AFVOERLEIDINGEN GROEPEN (M)			
GROEP 1 - AANVOER		GROEP 1 - AFVOER	
GROEP 2 - AANVOER		GROEP 2 - AFVOER	
GROEP 3 - AANVOER		GROEP 3 - AFVOER	
GROEP 4 - AANVOER		GROEP 4 - AFVOER	
GROEP 5 - AANVOER		GROEP 5 - AFVOER	
GROEP 6 - AANVOER		GROEP 6 - AFVOER	
GROEP 7 - AANVOER		GROEP 7 - AFVOER	
GROEP 8 - AANVOER		GROEP 8 - AFVOER	
AFWERKING CUNETTEN			
DIEPTE CUNET (M)		DIKTE ZANDBED (M)	
VERKLIKKERLINT		DIEPTE (M)	

5. VOORSPOELEN EN TESTEN			
PROJECT			
PROJECTNUMMER			
DATUM		LOCATIE	
UITVOERDER			
CONTACTPERSOON		TELEFOON	
CONTROLEUR			
CONTACTPERSOON		TELEFOON	
VOORSPOELEN			
MINIMALE DEBIET (M ³ /UUR)		MINIMALE SNELHEID (M/S)	
BEREIKT DEBIET (M ³ /UUR)		BEREIKTE SNELHEID (M/S)	
SCHOON (VISUEEL: JA/NEE)		SPOELDUUR (UUR)	
DICHTHEIDSTEST			
DRUK START (BAR)	TIJDSDUUR (UUR)	DRUK EIND (BAR)	
VISUELE INSPECTIE			
HANDTEKENING ACCEPTATIE			
MECHANISCHE STERKTETEST			
DRUK START (BAR)	TIJDSDUUR (UUR)	DRUK EIND (BAR)	
VISUELE INSPECTIE			
HANDTEKENING ACCEPTATIE			

6. AFVULLEN			
PROJECT			
PROJECTNUMMER			
DATUM		LOCATIE	
UITVOERDER			
CONTACTPERSOON		TELEFOON	
TYPE MENGEL			
FABRICANT			
PERCENTAGE	SYSTEEM VOLUME (L)	VOLUME GLYCOL (L)	DICHTHEID (KG/L)
ONTLUCHTTEN			
AFREGELLEN GROEPEN			
GROEP 1 - DEBIET		GROEP 2 - DEBIET	
GROEP 3 - DEBIET		GROEP 4 - DEBIET	
GROEP 5 - DEBIET		GROEP 6 - DEBIET	
GROEP 6 - DEBIET		GROEP 8 - DEBIET	