



Werkdocument:

Ondiepe geothermie: ontwerp en uitvoering van bodemenergiesystemen met U-vormige bodemwarmtewisselaars

Auteurs: L.François, P.Van den Bossche, G. Van Lysebetten

Datum: 22/07/2015

Versie 3.3

Deze studie werd uitgevoerd in het kader van het IWT-VIS traject Smart Geotherm (2011-2017)

Inhoudstabel

0	Voorwoord	4
1	Inleiding	5
1.1	Ondiepe geothermie en warmtepompen	5
1.2	Wat is geothermie of aardwarmte.....	6
1.3	De aarde als bron en/of als opslagvat voor thermische energie.....	7
1.4	Bodemenergiesysteem.....	8
1.5	Warmtepompen	16
1.6	Sanitair warm water	20
1.7	Afgiftezijde, lage temperatuursystemen.....	21
1.8	Terminologie en symbolen.....	22
2	Wetgeving en vergunningen	26
2.1	Locatie.....	26
2.2	Diepte	26
2.3	Vergunningsvoorwaarden	26
3	Ontwerp van bodemenergiesysteem.....	28
3.1	eenvoudige systemen.....	28
3.2	Complexe systemen	30
3.3	Bepaling van de behoefte aan thermische energie	35
3.4	Thermische behoefte uit de bodem	37
3.5	De thermische bodemeigenschappen	42
3.6	Het bodemenergiesysteem.....	47
3.7	Fluïdum (thermisch dragermedium, warmtetransportmiddel)	60
3.8	Hydraulisch netwerk.....	62
3.9	Bestek-lastenboek.....	82
4	De installatie van het bodemenergiesysteem	83
4.1	Uitvoeren van verticale boringen	84
4.2	Aanbrengen van de bodemwarmtewisselaar.....	92
4.3	Afwerken van het boorgat	95
4.4	Aanleg horizontaal netwerk	107
4.5	Indienststelling van het bodemenergiesysteem.....	123

4.6	Nazorg.....	126
5	Lijst van figuren.....	128
6	Lijst van tabellen	131
7	Bijlagen.....	132
7.1	bepaling SPF volgens EPB.....	132
7.2	Specifieke onttrekkingswaarden voor verticale bodemwarmtewisselaars	133
7.3	Thermische bodemkarakteristieken	134
7.4	Laboratoriummethodes voor de bepaling van de thermische geleidbaarheid	135
7.5	Thermische Respons Test (TRT)	135
7.6	Aanwezigheid van nutsleidingen.....	147
7.7	Minder courante boormethodes	148
7.8	Testmethoden voor bepaling van de thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal	155
7.9	Testmethode vorstbestandheid.....	157
7.10	Minimum spoeltijd per bodemwisselaar	160
7.11	Maximum toegelaten drukval.....	162
7.12	Testprocedure drukproef.....	164
7.13	Voorbeelden hydraulische schema's	165
8	Literatuur en normatieve documenten.....	166
9	Bibliografie	169

0 Voorwoord

Op 23 januari 2008 stelde de Europese Commissie het klimaat-energiepakket voor. Europa toont hiermee aan dat het klaar is om wereldwijd het initiatief te nemen in de strijd tegen de klimaatverandering, het streven naar een continue, duurzame en concurrerende energievoorziening, en de omvorming van de Europese economie tot een voorbeeld van duurzame ontwikkeling in de 21e eeuw. Het klimaat-energiepakket kan bovendien de bevoorradingszekerheid ten goede komen.

Op Europees niveau wil men de volgende doelstellingen bereiken:

- Een bindende doelstelling tot een **reductie van de broeikasgassen met 20 %** tegen 2020 (met als uitgangspunt 1990). Een bindende doelstelling tot een reductie van 30 % broeikasgassen indien andere geïndustrialiseerde landen bereid zijn zich tot deze doelstelling te engageren in het kader van een internationaal akkoord;
- Een doelstelling van **20 % hernieuwbare energie** in de totale energiemix van de Europese Unie tegen 2020, inclusief 10 % hernieuwbare energie in de transportsector;
- 33Realiseren van het EU-besparingspotentieel van **20 % voor energie-efficiëntie** ten opzichte van de prognoses van 2020.

Het energiegebruik in gebouwen neemt 40 % van het totale energieverbruik voor zijn rekening. Dit heeft er toe geleid dat men ambitieuze doelstellingen heeft vastgelegd op het vlak van de energieprestatie van gebouwen. Op 19 mei 2010 werd er immers door het Europese Parlement en de Raad een vernieuwde energieprestatierichtlijn vastgelegd, de zogenaamde EPB-recast. Volgens deze richtlijn moeten alle lidstaten ervoor zorgen dat alle nieuwe gebouwen vanaf 2020 “nearly zero-energy buildings” zijn. Ook ten aanzien van de renovatie van gebouwen dienen er duidelijke ambities vastgelegd te worden op vlak van energieprestatie.

Zo moet in Vlaanderen vanaf 1 januari 2014 elke nieuwe woning, kantoor en school in Vlaanderen een minimum hoeveelheid energie halen uit hernieuwbare bronnen. Om deze doelstelling te bereiken kan het thermische potentieel van de bodem ingezet worden voor de verwarming en koeling van gebouwen.

Via warmtewisselaars die aangebracht worden de bodem maar ook in bouw- of funderingselementen kan men thermische energie uitwisselen tussen het grondmassief en de binnenomgeving om aldus de omsloten ruimtes te verwarmen of te koelen. Meestal wordt hiervoor ook een warmtepomp ingeschakeld. Met dergelijke grondgekoppelde systemen kan er ook passief gekoeld worden. In dit geval komt de warmtepomp er niet aan te pas en maakt men gebruik van de opgeslagen koude in de ondergrond. In deze gevallen haalt men winstfactoren van 20 tot 50.

Vooropgestelde rendementen kunnen slechts gehaald worden door een doordacht ontwerp en professionele uitvoering van de installatie.

1 Inleiding

1.1 Ondiepe geothermie en warmtepompen

De toepassing van ondiepe geothermie moet steeds worden gezien in combinatie met een warmtepomp.

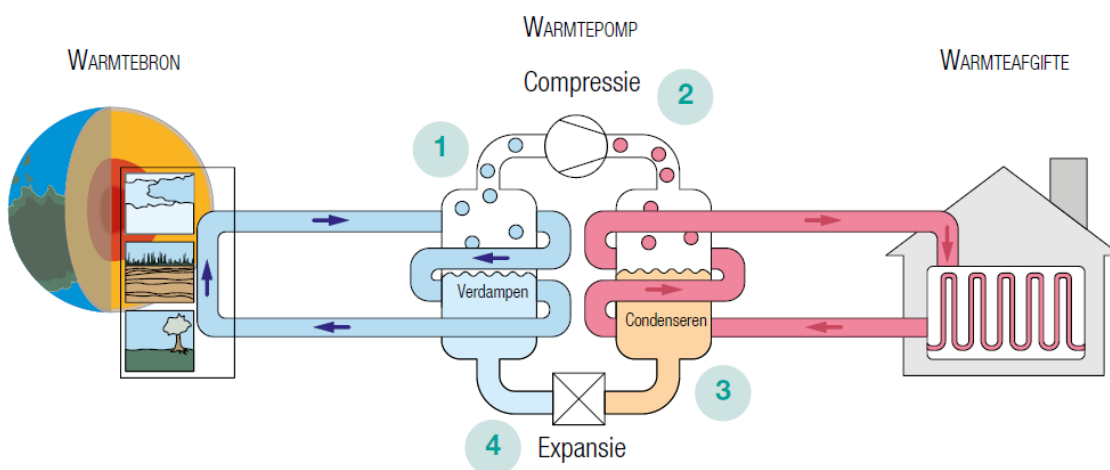
Een warmtepomp is een toestel dat warmte aan lage temperatuur onttrekt aan een bron en op hogere temperatuur weer afgeeft aan een systeem voor ruimteverwarming of voor de aanmaak van bijvoorbeeld sanitair warm water.

In geval van ondiepe geothermie vormt de aarde de energiebron

Een geothermische installatie bestaat uit drie hoofdelementen:

1. een bodemenergiesysteem om energie met de ondergrond uit te wisselen
2. een warmtepomp om de temperatuur te verhogen (bij verwarming) of te verder verlagen (bij koeling)
3. een afgiftesysteem om de tot op de gewenste temperatuur gebrachte energie te verspreiden in het gebouw.

Deze drie elementen zullen kort worden besproken nadat we hebben uitgelegd hoe de aarde als bron en/of buffer van thermische energie fungeert.

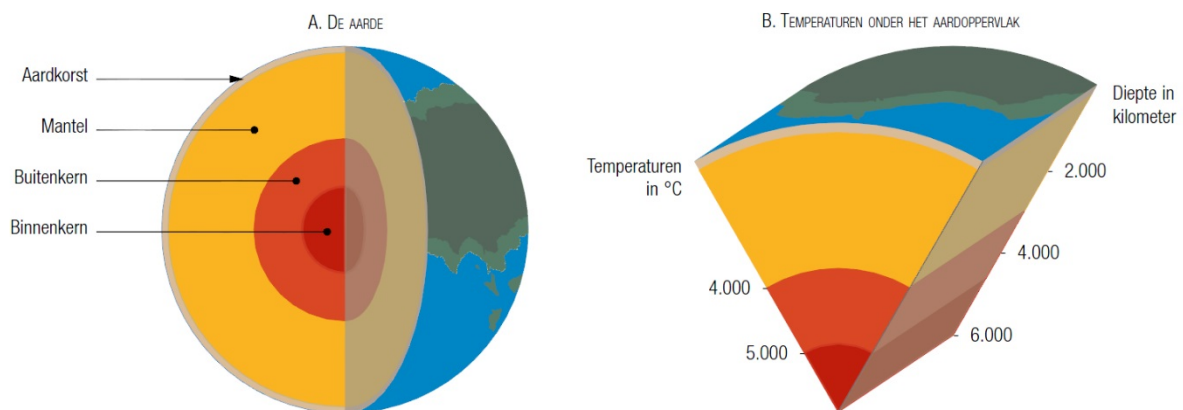


Figuur 1: algemeen principe van een warmtepompinstallatie, bron WTCB-Dossiers 2013/3.2

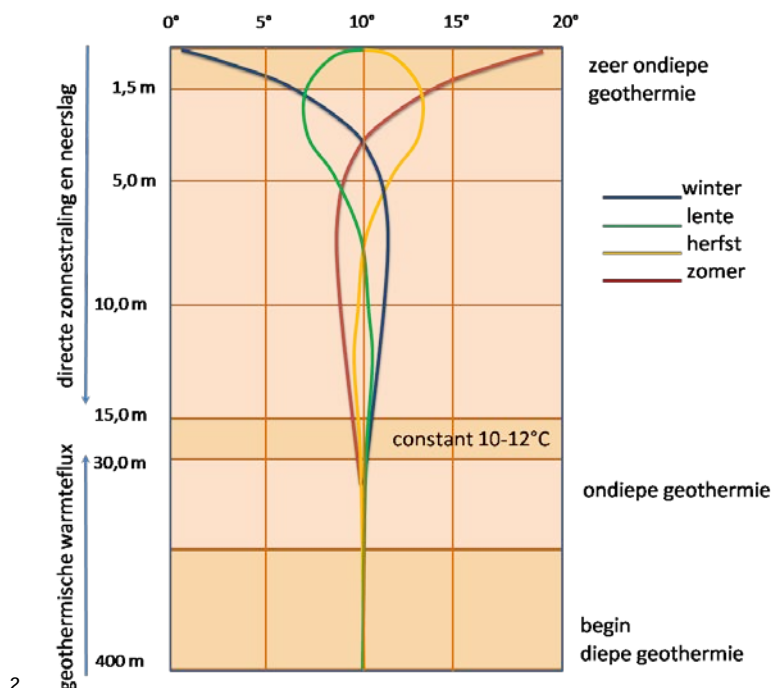
1.2 Wat is geothermie of aardwarmte

De temperatuur in de kern van de aarde bedraagt zo'n 5.000 °C (zie afbeelding). Net onder het aardoppervlak wisselt de temperatuur sterk doordat ze beïnvloed wordt door het klimaat. In België heerst er vanaf 18 m diepte een evenwichtstemperatuur van 10 tot 12 °C. Dieper in de aarde neemt de temperatuur toe met 2 tot 3 °C per 100 m. Ondanks deze lage temperaturen is er op deze 'ondiepte' (tot 500 m) een immense hoeveelheid thermische energie voorhanden die zich voortdurend hernieuwt.

Indien de aardwarmte gewonnen wordt op een diepte van meer dan 500 m (soms tot 2.500 m of dieper), spreekt men over 'diepe geothermie'. Het grondwater dat vanop deze diepten naar boven gepompt wordt, kan rechtstreeks voor verwarmingsdoeleinden of elektriciteitsproductie gebruikt worden.



Figuur 2: Evolutie van de temperaturen onder het aardoppervlak; Bron: WTCB dossier 2013/3.2

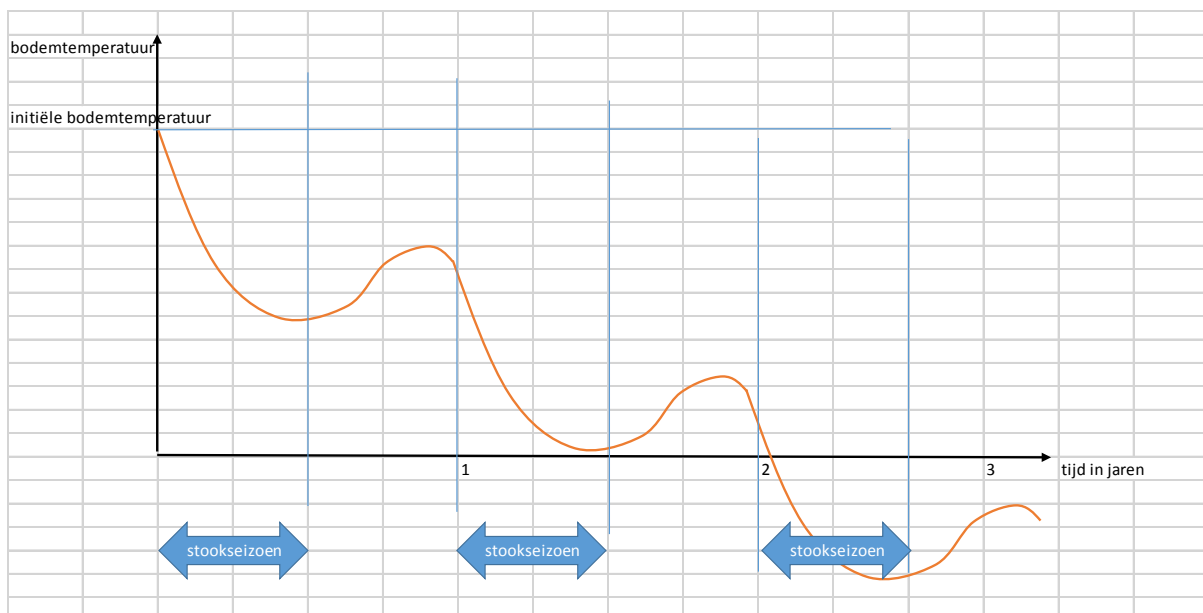


Figuur 3: temperatuursverloop bij ondiepe geothermie

1.3 De aarde als bron en/of als opslagvat voor thermische energie

Hoewel de aarde een schier onuitputtelijke bron van thermische energie vormt, kan men plaatselijk niet ongelimiteerd energie uit de ondergrond halen. Als er warmte wordt onttrokken ontstaat er plaatselijk een zone met een lagere temperatuur. Initieel zal de warmte in de onmiddellijke omgeving naar die zone stromen. Indien er echter over een bepaalde periode meer warmte wordt onttrokken dan door o.a. geleiding wordt aangevoerd, zal de bodemtemperatuur plaatselijk dalen zoals tijdens het stookseizoen meestal het geval zal zijn. Buiten het stookseizoen zal de bodemtemperatuur terug stijgen. Zoals verder duidelijk zal worden, is de snelheid waarmee deze regeneratie gebeurt, afhankelijk van diverse factoren zoals de hoeveelheid onttrokken energie, de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond, de aanwezigheid van grondwaterstromingen, de opstelling van het bodemenergiesysteem enz.

Bij een onvoldoende herstelling van de bodemtemperatuur zal deze jaar na jaar dalen. Men noemt dit een thermische onbalans. Dit fenomeen zal leiden tot een afnemend rendement van de installatie.

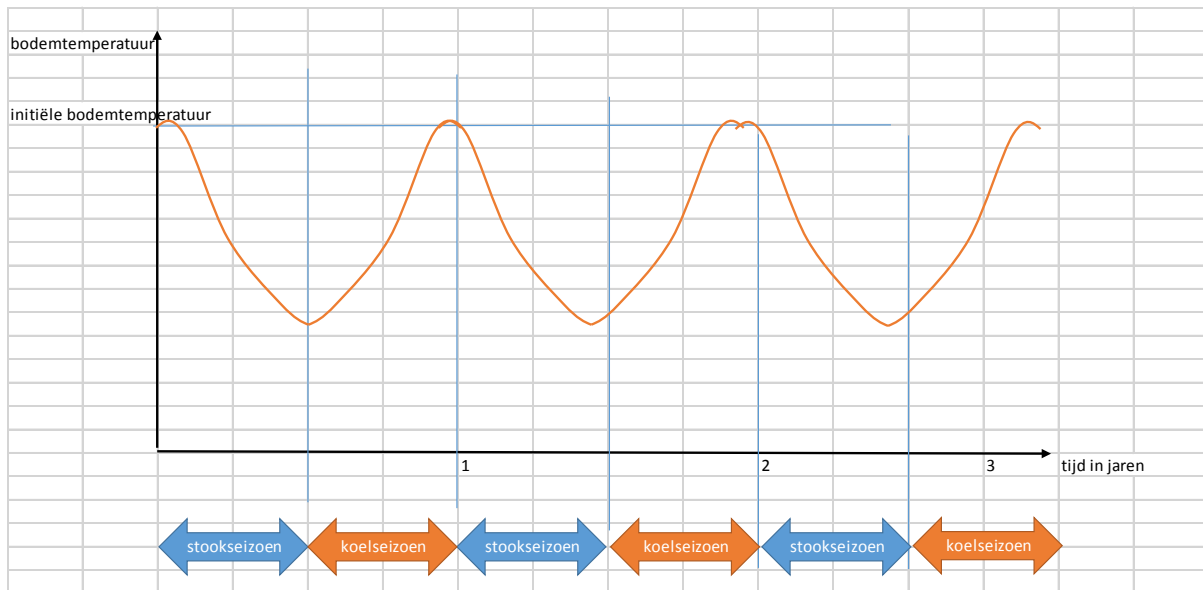


Figuur 4: bodemtemperatuurverloop bij thermisch onbalans

Men kan deze onbalans vermijden door niet alleen warmte aan de ondergrond te onttrekken, maar door ook warmte naar de ondergrond terug te voeren. De warmte kan het resultaat zijn van het koelen van het gebouw maar kan ook afkomstig zijn als restwarmte van bijvoorbeeld zonnecollectoren, industriële processen enz.

In dit geval gebruikt men de aarde niet louter als thermische bron maar ook als tijdelijk thermisch opslagvat.

Een goed uitgebalanceerd systeem zal leiden tot een nagenoeg constante bodemtemperatuur en rendement van de installatie.



Figuur 5: bodemtemperatuurverloop bij thermische balans

1.4 Bodemenergiesysteem

De energie kan op verschillende manieren uit de aarde onttrokken en teruggevoerd worden. Men kan in deze context een onderscheid maken tussen:

- open systemen op basis van grondwater
- gesloten systemen op basis van kunststof bodemwarmtewisselaars

1.4.1 Open systemen

Bij de open systemen (zie afbeelding 6 en 7) worden er twee grondwaterputten in de bodem geboord. De eerste put wordt gebruikt voor het oppompen van het water waaruit de warmte zal onttrokken worden. Via de tweede put wordt het aldus afgekoelde water terug in de grond geïnjecteerd om in de zomer opnieuw opgepompt te worden om het gebouw te koelen. Hierdoor warmt het water opnieuw op en kan het terug in de grond geïnjecteerd worden om tijdens de winterperiode hergebruikt te worden voor de verwarming. Door een goede balans

na te streven tussen de behoefte aan koelen en verwarmen, wordt een thermische onbalans in de bodem vermeden.

Deze systemen worden ook Koude Warmte Opslagsystemen (KWO) of ATES (Aquifer Thermal Energy Storage) genoemd.



Figuur 6: open systeem tijdens stookseizoen



Figuur 7: open systeem tijdens koelseizoen

1.4.2 Gesloten systemen

Terwijl bij open systemen het grondwater de energiedrager is, wordt deze functie bij gesloten systemen overgenomen door een vloeistof (veelal een mengsel van water en antivries) die door een ondergronds netwerk van warmtewisselaars stroomt.

Afhankelijk van de aard en de ligging van dit netwerk maken we een onderscheid tussen

- horizontale wisselaars,
- U-vormige verticale wisselaars,
- concentrische wisselaars,
- spiraalvormige wisselaars

Deze wisselaars kunnen rechtstreeks in de bodem worden aangebracht, maar kunnen geïntegreerd zijn in een ondergrondse structuur. We spreken dan van **geothermische structuren** zoals energiepalen.

Tenslotte kan er ook energie uit de bodem worden onttrokken d.m.v. de onmiddellijke verdamping van een gas-vloeistofmengsel dat door een koperen leidingnetwerk doorheen de ondergrond stroomt. Deze systemen noemt men **directe expansiesystemen**.

1.4.3 Horizontale bodemwarmtewisselaars

Horizontale lussen van kunststof worden in de bodem aangebracht op een diepte van 1.2 en 2m.



Figuur 8: Horizontale bodemwarmtewisselaars

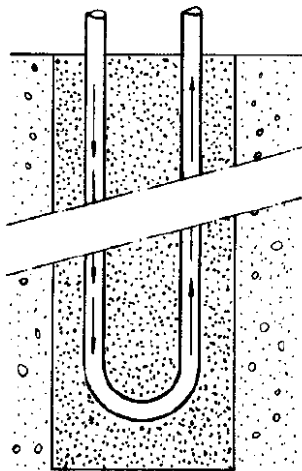
De lussen werken grotendeels als ondergrondse zonnecollectoren: in de winter wordt warmte uit de ondiepe grond geput, terwijl in het zomerseizoen het 'warmtereservoir' terug gevuld wordt door de zonne-instraling en de infiltratie van regenwater..

De eenvoudige installatie en de beperkte vermogensuitwisseling van horizontale bodemwarmte-wisselaars maakt dat deze techniek zich optimaal voor de residentiële sector. De techniek kan echter niet worden gebruikt voor de koeling van het gebouw en vergt een vrij beschikbare buitenruimte van ongeveer tweemaal het te verwarmen oppervlak van het gebouw.

1.4.4 U-vormige verticale bodemwarmtewisselaars

In de bodem worden gaten geboord met een diameter van 15 à 20 cm tot op een gangbare diepte van 100 à 120m. In deze boorgaten worden U-vormige kunststofbuizen geplaatst waardoor later een vloeistof stroomt die de energie met de bodem zal uitwisselen. De vloeistof bestaat meestal uit een mengsel van water en antivries.

Het is deze vorm van bodemenergiesysteem dat in dit technisch voorlichting verder wordt uitgewerkt.



Figuur 9: U-vormige verticale warmtewisselaar

Verticale warmtewisselaars kunnen worden gebruikt om enkel warmte uit de grond te onttrekken. Het systeem leent zich echter ook om de ondergrond als buffer te gebruiken waarbij zowel warmte als koude kan worden opgeslagen die in een latere fase terug kan worden benut.



Tijdens de winterperiode wordt door de bodemwarmtewisselaar warmte aan de bodem onttrokken die via een warmtepomp instaat voor de verwarming van een gebouw. Door de onttrekking van warmte daalt de bodemtemperatuur tot een minimum op het einde van het stookseizoen.



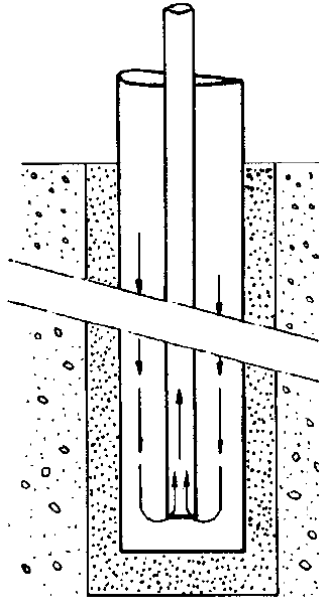
Tijdens de zomerperiode wordt door diezelfde bodemwarmtewisselaar de opgeslagen koude naar boven gebracht. Hierdoor zal de bodemtemperatuur terug stijgen. De warmte die onttrokken wordt aan het gebouw, wordt in de bodem opgeslagen.

Figuur 10: verticale bodemwarmtewisselaars

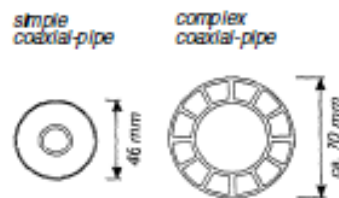
Omdat dit systeem gebruik maakt van de bodem als tijdelijke opslag van energie, noemt men dit ook **Boorgat-energieopslag (BEO)** of Borehole Thermal Energy Storage (BTES).

1.4.5 Concentrische bodemwarmtewisselaars

Deze warmtewisselaar bestaat, in de eenvoudige variant, uit een buitenbuis die aan de onderzijde wordt afgesloten met een stop. Binnen in deze buitenbuis wordt een tweede buis gebracht waardoor er twee stroomkanalen ontstaan.



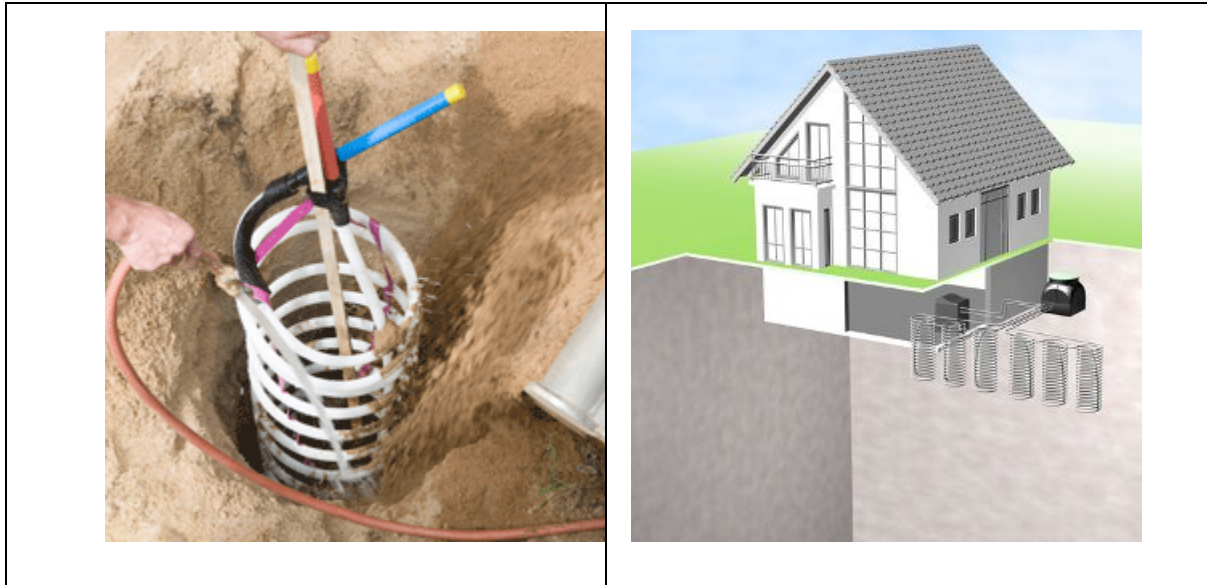
De buitenbuis kan uit één of meerdere compartimenten bestaan. Zie figuur.



Figuur 11: compartimentering van concentrische warmtewisselaars

In sommige buitenlandse toepassingen ontbreekt de buitenbuis en stroomt het water in de annulus tussen de binnenbuis en de boorgatwand. Deze uitvoering is enkel mogelijk in een stabiele en niet-doorlatende ondergrond.

1.4.6 Spiraalvormige bodemwarmtewisselaars



Figuur 12: spiraalvormige wisselaars bron REHAU

De spiraalvormige sonde wordt standaard tot een maximale diepte van 3 meter geplaatst. Dit systeem heeft een opbrengst die zich situeert tussen de horizontale en de U-vormige verticale warmtewisselaar. Men kan naar grotere dieptes gaan door verschillende sondes aan elkaar te bevestigen.

1.4.7 Geothermische structuren of thermo-actieve structuren

De warmtewisselaars kunnen in plaats van rechtstreeks in de bodem te worden geplaatst, ook in een geotechnische structuur worden geïntegreerd. Deel uitmakend van de structuur hebben ze dezelfde functie als klassieke bodemwarmtewisselaars namelijk energie uitwisselen met de ondergrond.

De meest voorkomende toepassing is de energiepaal waarbij de warmtewisselaar geïntegreerd wordt in een paalfundering.

Bij heipalen wordt de warmtewisselaar vooraf in de geprefabriceerde paal voorzien.



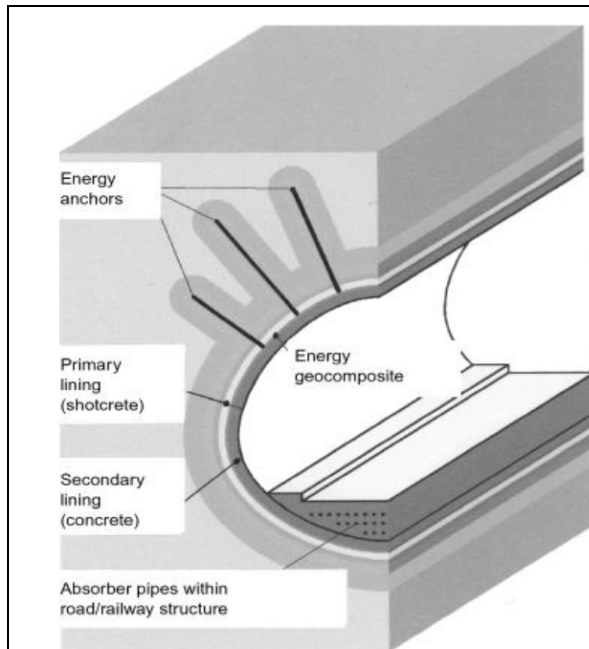
Figuur 13: thermo-actieve heipalen, bron TNO rapport heipalen

Bij in-de-grond gevormde funderingspalen en boorpalen, worden de warmtewisselaars op een wapeningskorf gemonteerd en in het boorgat neergelaten dat aansluitend wordt gevuld met beton.

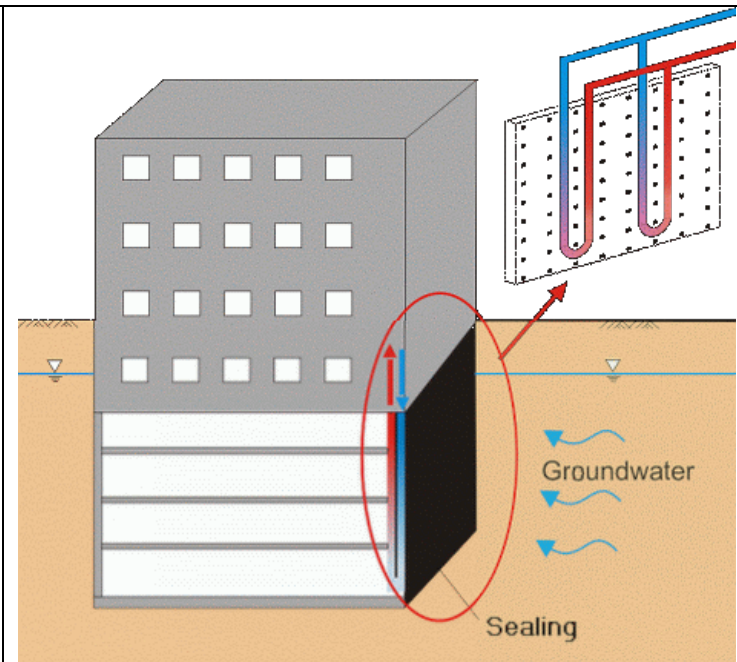


Figuur 14: In de grond gevormde energiepaal, bron: WIGpalen

Ook andere geotechnische structuren kunnen zich lenen voor de integratie van warmtewisselaars zoals funderingswanden, tunnelelementen, micro-ankers, enz.



Figuur 15: thermo-actieve tunnelelementen



Figuur 16: thermo-actieve diepwanden

1.4.8 Systemen met directe expansie

Systemen met directe expansie zijn ook gekend als direct Exchange, DX, direct expansion of directe verdamping.

Bij deze systemen verdampt een koelmiddel (veelal Freon) direct in de koperen leidingen die in de ondergrond zijn aangebracht. De koperen leidingen combineren de functie van bodemwarmtewisselaar en verdamper.

In tegenstelling tot de typische geothermische systemen zijn er geen PE-buizen met een mengsel van water en antivries; er is ook geen pomp die het water door de ondergrond moet doen circuleren.

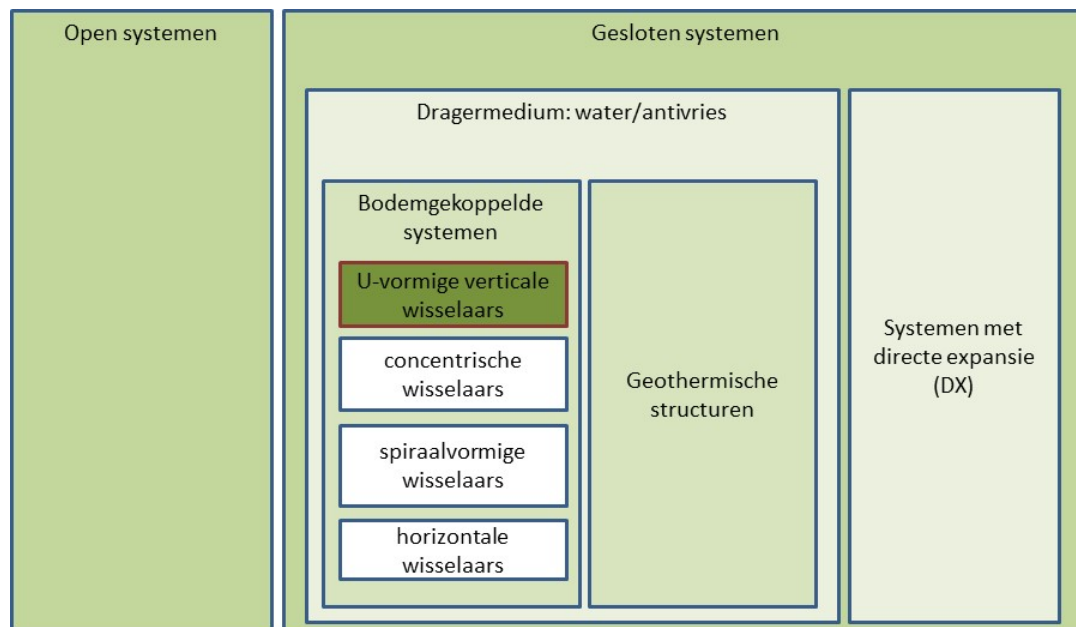
Door de betere geleidbaarheid van koper t.o.v. de PE-buizen, heeft het systeem een kortere bodemwarmtewisselaar dan bij de klassieke water-antivries systemen.

Het systeem kan worden gebruikt voor de productie van warm water voor de vloerverwarming, radiatoren of sanitair water. Het kan ook toegepast worden voor actieve koeling.

Systemen met directe expansie komt eerder voor bij residentiële toepassingen. Ze worden in deze voorlichtingsnota niet verder behandeld.

1.4.9 Overzicht van de bodemenergiesystemen en scope van de nota

De scope van deze Technische Voorlichting is tot het ontwerp en de uitvoering van bodemenergiesystemen met U-vormige verticale bodemwarmtewisselaars;



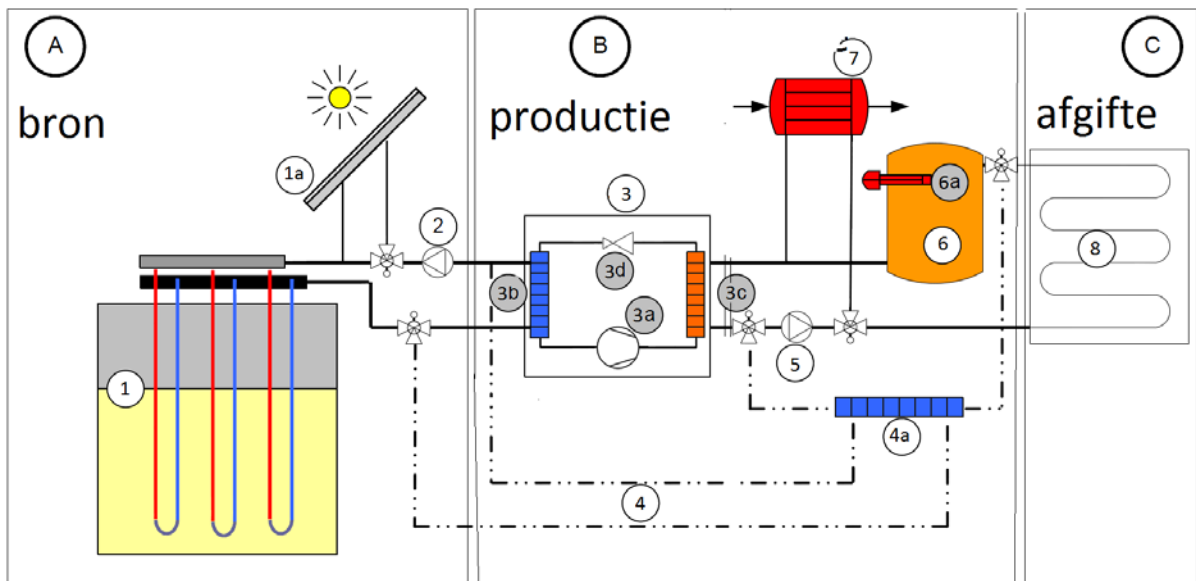
Figuur 17: overzicht van de bodemenergiesystemen

1.5 Warmtepompen

De warmtepomp is het hart van een geothermische installatie . Zij zorgt ervoor dat lage-bodemtemperatuur verhoogd wordt tot de gewenste temperatuur voor het afgiftesysteem.

1.5.1 Algemene werking van een geothermische installatie

De werking van een geothermische installatie wordt in zijn algemeenheid geïllustreerd in onderstaande figuur, andere configuraties zijn mogelijk.



Figuur 18: opbouw van een geothermische installatie

A. Bron:

- (1) Bodemenergiesysteem
 - (a) Zonnecollector voor bodemregeneratie
- (2) Circulatiepomp aan bronzijde

B. Productie:

- (3) Warmtepomp
 - (a) Compressor
 - (b) Verdampers
 - (c) Condensor
 - (d) Expansieventiel
- (4) Passieve koeling via warmtewisselaar
- (5) Circulatiepomp aan afgiftezijde
- (6) Buffervat met eventueel bijverwarming door het hydride -systeem
- (7) Sanitair warm watervoorziening

D. Vraag

- (8) Afgiftesysteem ruimteverwarming

1.5.2 Verwarmingsbedrijf

In het geval het gebouw moet verwarmd worden (verwarmingsbedrijf), stroomt het door de warmtepomp (3) in haar verdampers (3b) afgekoeld fluidum, dmv de pomp (2), naar de U-vormige bodemwarmtewisselaars (1), waar het wegens zijn lagere temperatuur als deze van de omringende bodem, opgewarmd wordt.

Dit door de bodem opgewarmde fluidum stroomt vervolgens terug naar de verdampers van de warmtepomp (3b) waar het aanleiding geeft tot de verdamping van het medium in de warmtepomp en tegelijk zelf terug afkoelt. De aldus aan de verdampers afgegeven energie wordt dan door de warmtepomp (3) naar een hoger temperatuur niveau opgepompt zodat de som van de aan de bodem onttrokken energie en deze geleverd door de compressor (3a) van

de warmtepomp, kan gebruikt worden voor de verwarming van het gebouw (bv via een vloerverwarming 8, eventueel mits tussenschakeling van een buffervat (6) of voor de productie van sanitair warm water (7).

1.5.3 Koelbedrijf

Er zijn twee verschillende manieren om een gebouw via een geothermische installatie te koelen: actieve en passieve koeling.

Passieve koeling

Het fluïdum stroomt door de bodemwarmtewisselaar (1) en geeft zijn warmte af aan de bodem en koelt daardoor af. Het afgekoelde fluïdum stroomt via leidingen (4) naar de warmtewisselaar (4a), neemt hier de warmte op van afgiftesysteem (8) en vervolgt zijn weg terug naar de bodemwisselaar (1) waardoor de cyclus kan herbeginnen. Buiten de circulatiepomp (2) is in dit proces geen verdere energie vereist.

Actieve koeling

De werking van de warmtepomp is nu gelijkaardig aan deze van een koelkast. De koelkring is inwendig omgekeerd waardoor de koelvloeistof binnen de warmtepomp in de andere richting stroomt. De verdamper wordt nu de condensor.

In vergelijking met een traditionele airco-installatie heeft deze vorm van koeling een lager energieverbruik dan een traditionele airco-installatie. Toch is deze techniek minder rendabel dan de passieve koeling.

1.5.4 Rendement

Het enige onderdeel van een warmtepomp dat energie verbruikt, is de compressor waarmee de druk en dus ook de temperatuur van het warmtedragend medium wordt verhoogd.

Het rendement of de winstfactor van een warmtepomp wordt dan ook bepaald door het energieverbruik van de compressor.

Deze winstfactor of **COP (Coefficient Of Performance)** wordt berekend door de geleverde nuttige energie te delen door de verbruikte (elektrische) energie.

Hebben we bijvoorbeeld een warmtepomp met een COP van 4; dan zal met één kWh verbruikte elektriciteit, 4kWh nuttige warmte worden opgewekt.

Hoe groter de temperatuurverhoging die moet worden gerealiseerd door de warmtepomp, hoe groter de drukverhoging die de compressor moet bewerkstelligen. Dit vergt op zijn beurt weer meer energie waardoor de COP van de warmtepomp zal dalen.

De winstfactor of COP van een warmtepomp zal dus stijgen bij een hogere temperatuur van de warmtebron en een lagere vereiste temperatuur van het afgiftesysteem.

Door de schommelingen van de temperatuur aan de bron- en afgiftezijde zal dus ook de COP van de installatie variëren. Daarom werd de **SPF (seasonal performance factor)** in leven geroepen die de prestatie van het warmtepompsysteem gedurende een volledige winterperiode in rekening brengt. Bovendien brengt de SPF ook het energieverbruik van de hulptoestellen zoals pompen en ventilatoren in rekening.

1.5.5 Bedrijfsmodi

Warmtepompen staan niet noodzakelijk alleen in voor de warmteproductie in een gebouw, daarom is het dus ook niet nodig dat al te leveren energie aan de bodem wordt onttrokken.

Het vermogen van een warmtepomp zal in dat geval niet gelijkgesteld worden aan het vermogen dat nodig is voor ruimteverwarming en de bereiding van sanitair warm water.

De verhouding tussen beide vermogens noemt men de beta-factor. (β). Een Beta-factor van 0.5 betekent dus dat het condensatorvermogen van de warmtepomp 50% bedraagt van het benodigde thermisch vermogen. De ontwerper bepaalt deze factor in functie van het gekozen back-upsysteem, de grootte van het project en de maximale investering.

Afhankelijk van de installatie kunnen volgende bedrijfsmodi worden onderscheiden :

- a) Monovalent
- b) Mono-energetisch
- c) Bivalent

a) Monovalente bedrijfsmodus

In een monovalente bedrijfsmodus is de warmtepomp de enige opwekker van warmte. Er is dus geen extra bijverwarming (bijstook) voorzien.

Monovalente systemen vinden we voornamelijk terug in één- en meergezinswoningen.

Voor grotere vermogens kan er geopteerd worden om het warmtepompvermogen te verdelen over twee compressoren. Eén compressor kan dan gedurende een groot deel van het jaar functioneren op een aantrekkelijk hoog rendement.

b) Mono-energetische bedrijfsmodus

Bij een mono-energetische installatie wordt een tweede warmtebron toegevoegd gebaseerd op dezelfde soort energie. Een elektrische warmtepomp bijvoorbeeld wordt ondersteund door een elektrische bijstook in een buffervat (6a). (zie vorige fig...)

Dit systeem is aan te bevelen bij grotere gebouwen boven een monovalent systeem omdat er een warmtepomp met aanzienlijk kleiner vermogen kan worden voorzien. Hierdoor dalen de investeringskosten terwijl het energetisch rendement nauwelijks wordt beïnvloed. De bijstook moet zelden bijspringen terwijl de warmtepomp langduriger op vollast kan functioneren wat energetisch gezien efficiënter is.

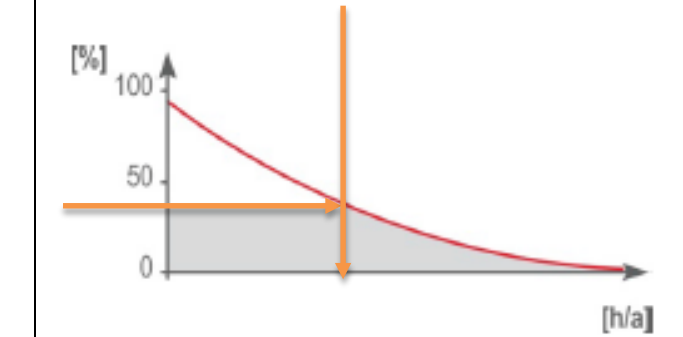
Bovendien kan bij een defect of onderhoud van de warmtepomp toch een aanzienlijk deel van de warmte kan worden geproduceerd door de bijstook.

c) Bivalente bedrijfsmodus

Voor de grote vermogens wordt vaak gekozen voor een bivalente bedrijfsmodus. Naast de warmtepomp is er dan minstens nog een andere warmtebron op basis van vaste, vloeibare of gasvormige brandstoffen.

Deze extra energie-opwekker kan zowel op een parallelle of alternatieve werking worden ingeschakeld.

Onderstaande grafieken zijn belastingsduurcurven. De Y-as geeft het procentuele benodigde vermogen aan waarbij het 100% het maximale totale nodige vermogen is. De X-as geeft aantal vollasturen (te definiëren) aan dat de installatie moet draaien.

 <i>figuur 19: bivalente alternatieve modus</i>	De warmtepomp is in werking tot een bepaald maximum vermogen is bereikt. Vanaf dat punt wordt de warmteproductie volledig overgenomen door het tweede systeem
 <i>figuur 20: bivalente parallel modus</i>	Beide warmteopwekkers worden vanaf een bepaald vermogen gelijktijdig gebruikt.

1.6 Sanitair warm water

De benodigde energie voor de bereiding van sanitair warm water is afhankelijk van de hoeveelheid, de vereiste temperatuur (50°C, 55°C, 60°C), de boilerinhoud en de laadtijd van de boiler.

Voor een relatief hoog verbruik aan sanitair warm water wordt meestal geopteerd voor een separaat systeem met een gas- of stookolie gestookt toestel.

Anderzijds voor een zeer laag verbruik aan sanitair warm water, bijvoorbeeld bij kantoren, is het aangewezen om plaatselijk doorstroomboilers te voorzien.

Indien de ontwerper kiest om het sanitair water te verwarmen via de geothermische warmtepomp moet hij rekening houden met het feit dat door een temperatuursverhoging tot 50 à 60°C de COP van de warmtepomp drastisch daalt. Er kan dan beter voor een combiwarmtepomp worden gekozen. Met dit type van warmtepomp kan zowel voorzien worden in de behoefte aan ruimteverwarming als de basisbereiding van warm sanitair water.

De verdere opstook kan dan bijvoorbeeld 's nachts gebeuren aan een lager tarief van elektriciteit.

Als echter een hoog temperatuurniveau voor het warm tapwater wordt gewenst (bijvoorbeeld 60°C of nog hoger), kan het interessant worden om een andere invulling te overwegen, bijvoorbeeld een tweede warmtepomp met lucht als bron (ventilatielucht en/of buitenlucht) of combinatie met een gas- of oliegestookt toestel.

Als het warmtapwaterverbruik relatief groot is, wordt het extra interessant om een combinatie met zonnewarmtebenutting te overwegen. Buiten de wintermaanden kan zonnewarmte als energiebron vrijwel volledig voorzien in de warmtapwaterbereiding en kan de warmtepomp buiten bedrijf blijven.

1.7 Afgiftezijde, lage temperatuursystemen

We hebben reeds aangehaald dat de winstfactor van een warmtepomp in grote mate bepaald wordt door het temperatuurverschil tussen de warmtebron en het warmte-afgiftesysteem. In die zin verdienen warmte-afgiftesystemen die op een lage of zeer lage temperatuur werkzaam zijn de voorkeur in combinatie met een warmtepomp.

Radiatoren en convectoren vereisen een aanvoertemperatuur tussen de 50-70°C. Vloer- en plafondverwarming daarentegen functioneren bij temperaturen tussen 30-40°C. Nog lagere temperaturen, 24-30°C kunnen bereikt worden bij gebruik van betonkernactivering (zie verder).

Warmtepompen worden daarom zeker interessant indien plafond-, wand- of vloerverwarming als hoofdverwarming wordt toegepast.

Voor het succesvol kunnen toepassen van lage temperatuurverwarming met behulp van een warmtepomp, dient het warmteverlies door de gebouwschil (transmissie- en ventilatieverlies) beperkt te zijn. Dit is nodig om het benodigde verwarmingsvermogen van de warmtepomp te beperken en om comfortproblemen te voorkomen.

Tabel 1: conventies voor de randvoorwaarden van warmteafgiftesystemen, bron WTCB-dossier Nr.4/2009

Warmteafgiftesysteem	Hoge-temperatuur-verwarming	Lage-temperatuur-verwarming	Zeet lage-temperatuur-verwarming
	$\theta_m > 55\text{ °C}$ (¹) $20 \leq \Delta\theta \leq 15\text{ K}$ (²)	$55 \geq \theta_m \geq 40\text{ °C}$ (¹) $15 \leq \Delta\theta \leq 10\text{ K}$ (²)	$40 \geq \theta_m \geq 30\text{ °C}$ (¹) $10 \leq \Delta\theta \leq 5\text{ K}$ (²)
Radiator / Convecter			
Vloer-, plafond- of wandver-warming			
Betonkernactivering			

(¹) θ_m : temperatuur van het vertrekwater (°C).
(²) $\Delta\theta$: temperatuurverschil tussen het vertrek- en het retourwater (K).

1.8 Terminologie en symbolen

1.8.1 Terminologie

1. Aquifer

Een ondergrondse laag van watervoerend doorlaatbaar gesteente of ongeconsolideerde materialen (grind, zand of slib) van waaruit grondwater kan worden gewonnen.

2. Ondiepe geothermie

Het uitwisselen van thermische energie opgeslagen in de ondergrond tot een diepte van maximaal 500m.

3. Gesloten systeem

Systeem waarbij de thermische energie wordt uitgewisseld door middel van één of meerdere gesloten bodemwarmtewisselaars die in de bodem zijn ingebracht.

4. Bodemenergiesysteem

Systeem of installatie die toelaat om thermische energie met de bodem uit te wisselen bestaande uit de bodemwarmtewisselaars, de collectoren, het horizontaal verdeelnet en de circulatiepomp aan bronzijde.

5. Boorveld

Het geheel van verticale bodemwarmtewisselaars

6. Bodemwarmtewisselaar

Buisvormige elementen die in de bodem worden aangebracht en waardoor een thermisch dragermedium stroomt. Dit dragermedium wisselt thermische energie uit met de bodem ten gevolge van temperatuurverschillen tussen het dragermedium en de omringende bodem.

7. Bronzijde

Aanduiding van het deel van de installatie waaruit de warmtepomp zijn energie onttrekt in deze context wordt met de bron, de aarde bedoeld.

8. Thermische boorgatweerstand (kort: boorgatweerstand) (R_b , mK/W)

Maat voor de thermische weerstand tussen het circulerend dragermedium in de bodemwarmtewisselaar en de wand van het boorgat.

9. Thermisch dragermedium, warmtetransportmiddel, verder fluïdum genoemd

Medium dat door het bodemenergiesysteem stroomt en de thermische energie uitwisselt tussen de bodem en het productiegedeelte (warmtepomp en/of bodemwarmtewisselaar).

10. Fluïdum

Zie thermisch dragermedium

11. Mediumtemperatuur

Temperatuur van het dragermedium. Tenzij uitdrukkelijk anders vermeld, wordt de gemiddelde temperatuur bedoeld van de heen- en retourleiding ter plaatse van de verdamper van de warmtepomp.

12. Bodemregeneratie

Feit dat er door de aanvoer van thermische energie naar het boorveld, de oorspronkelijke bodemtemperatuur binnen een bepaalde tijdspanne zich nagenoeg herstelt..

13. Energieopslag

Tijdelijke buffering van thermische energie met de bedoeling deze energie later terug aan te wenden om te koelen of te verwarmen.

14. Collector

Verdeelpunt van waaruit individuele bodemwarmtewisselaars of tichelmannleidingen vertrekken.

15. Tichelmann

Systeem waarbij de individuele warmtewisselaars aangesloten zijn op de hoofdleiding op zodanige wijze dat de som van de lengtes van de heen- en retourleiding van elke warmtewisselaar hetzelfde of in ieder geval niet meer dan 10% van elkaar verschillen.

16. Passieve koeling

Systeem waarbij koude aan het fluïdum wordt onttrokken enkel via een warmtewisselaar en dus niet via de warmtepomp.

17. Actieve koeling

Systeem waarbij koude aan het circulerend fluïdum wordt onttrokken via de warmtepomp.

18. Thermische Respons Test (TRT)

In situ proef ter bepaling van de thermische geleidbaarheid van de bodem.

19. Vulmateriaal

Verzamelnaam van materiaal dat na het boren van het boorgat en de installatie van de verticale bodemwarmtewisselaar in het boorgat wordt aangebracht.

20. Grout

Weinig permeabel vulmateriaal gebaseerd op bentoniet, kleikorrels en/of cement

21. Prestatiecoëfficiënt van een warmtepomp (Coëfficiënt Of Performance, COP)

De verhouding tussen het verwarmingsvermogen en het opgenomen vermogen van een warmtepomp bij vastgelegde temperatuurcondities.

22. Seizoensprestatiefactor (Seasonal Performance Factor, SPF)

Geeft de verhouding weer tussen de totale jaarlijkse energie geleverd door de warmtepomp aan het distributiesysteem voor verwarming en andere gekoppelde systemen (vb sanitair warm water) en de totale jaarlijkse elektrische verbruikte energie inclusief de totale elektrische hulpenergie.

1.8.2 Symbolen

Symbol	Betekenis
α	Temperatuurvereffeningscoëfficiënt of warmtediffusiviteit (m^2/s)
λ	Warmtegeleidingscoëfficiënt ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$)
c	Warmtecapaciteit (J/K)
c_p	specifieke of soortelijke warmtecapaciteit ($\text{J}/\text{kg}/\text{K}$)
R_B	Boorgatweerstand (mK/W)
T_g	Bodemtemperatuur (K)
k	Waterdoorlatendheid of permeabiliteit (m/s)

2 Wetgeving en vergunningen

Om de kwaliteit van de bodem en het grondwater te vrijwaren heeft de overheid beperkingen opgelegd met betrekking tot de locatie en de diepte van geothermische boringen.

Het type vergunning is bovendien ook afhankelijk van het geïnstalleerde vermogen van de warmtepomp.

Bij het verlenen van een vergunning legt de overheid ook voorwaarden op voor de aanleg, exploitatie en uitdienststelling van geothermische installaties. Dit zijn de zogenaamde vergunningsvoorwaarden.

2.1 Locatie

In waterwinningsgebieden die bestemd zijn voor het verzamelen en winnen van grondwater is het niet toegelaten om boringen uit te voeren. Rond deze waterwingebieden bevinden zich beschermingszones waar strenge normen gelden om verontreiniging van het grondwater te vermijden.

De locatie van deze gebieden is terug te vinden op kaarten van de gewestelijke overheid.

2.2 Diepte

Watervoerende lagen worden van elkaar gescheiden door waterscheidende lagen (bijv. kleilagen). Door deze lagen te doorboren kan men twee watervoerende lagen met elkaar in verbinding stellen, met alle gevolgen van dien (bijv. verspreiding vervuiling, drukverlies in bepaalde laag). Het doorboren van deze lagen wordt dan ook slechts onder strikte voorwaarden toegelaten. De aanwezigheid, de ligging en het drukverschil over de verschillende beschermende kleilagen zijn dan ook bepalend voor het verlenen van de vergunning. Deze info is terug te vinden bij de gewestelijke overheden.

Door het relatief jonge karakter van ondiepe geothermie is deze regelgeving het voorwerp van regelmatige herziening. Het is daarom raadzaam om zich te vergewissen van de laatste stand van zaken.

2.3 Vergunningsvoorwaarden

Volgende items kunnen deel uitmaken van de vergunningsvoorwaarden:

- De opmaak van een boorverslag met een beschrijving van de aangeboorde lagen, de diepte en de ligging van de boringen
- Materiaalkarakteristieken van de bodemwarmtewisselaar, het opvulmateriaal en het fluïdum
- De wijze van aanbrengen van de bodemwarmtewisselaar en het opvulmateriaal
- Het verplicht uitvoeren van druktesten op de installatie

- De monitoring van de installatie
- Het uitdienststellen van de installatie

3 Ontwerp van bodemenergiesysteem

Deze nota beperkt zich tot het ontwerp en de uitvoering van methodiek van een bodemenergiesysteem van verticale bodemwarmtewisselaars.

Dit betekent dat behoefteberekeningen voor de koeling en verwarming van het gebouw alsmede de aanmaak van warm sanitair warm water reeds gebeurd zijn.

Het ontwerpproces is veelal een iteratief proces waarbij bepaalde startwaarden zoals het maximaal te leveren vermogen, de totaal te onttrekken bodemenergie en COP van de warmtepomp moeten herzien worden in functie van het bodemtemperatuurverloop over de aangenomen levensduur van de installatie.

Een goed ontworpen bodemenergiesysteem zal het gevraagde vermogen moeten kunnen leveren (d.i. een korte termijnevaluatie) maar ook de totale jaarlijkse energiebehoefte kunnen dekken op een rendabele wijze en dit gedurende de aangenomen levensduur van de installatie.

De grondigheid waarmee de studie gebeurt, zal afhangen van de complexiteit van het te ontwerpen systeem. Voor kleine en/of eenvoudige systemen (beperkte systemen) zullen de extra kosten van een uitgebreid onderzoek en ontwerp niet opwegen tegen de eventuele winsten, terwijl voor een groot en complex systeem om reden van garanties en kwaliteitsborging altijd een degelijke ontwerpstudie moet worden uitgevoerd.

Het ontwerp van een beperkt systeem kan gebaseerd worden op eenvoudige handberekeningen, grafieken en tabellen.

Voor grotere en/of complexe projecten is het noodzakelijk een dynamische numerieke of semi-dynamische berekening uit te voeren. Deze berekeningen zijn gebaseerd op simulatiemodellen (vb. EED, TRNSYS) of vergelijkbare modellen en methodes waarbij bijvoorbeeld gebruikt gemaakt wordt van een standaard referentiejaar.

3.1 eenvoudige systemen

Een beperkt systeem wordt gekenmerkt door:¹

- Piekvermogen: < 30 kW
- Monovalente systemen met een maximum van 2400 draaiuren/jaar
- De kleinste afstand tussen boorgaten 5m tot 50m diepte en 6m dieper dan 50 m

¹ EN 15450, A.2.4

3.1.1 Methode op basis van specifiek onttrekkingsvermogen

De totale vereiste lengte van de bodemwarmtewisselaars wordt bepaald door het maximum piekvermogen dat moet worden onttrokken en het specifieke onttrekkingsvermogen.

Het maximum te onttrekken piekvermogen wordt als volgt berekend:

$$P_{ground} = \frac{P_{heating}}{SPF} \cdot (SPF - 1)$$

met

P_{ground} = verdampingscapaciteit van de warmtepomp in W of kW

$P_{heating}$ = verwarmingscapaciteit van de warmtepomp in W of kW

SPF = seizoensrendement bepaald volgens de EPB (zie bijlage...)

De totale lengte van de bodemwarmtewisselaars wordt dan als volgt berekend:

$$P_{ground} = n_{BHE} \cdot l_{BHE} \cdot P_{BHE}$$

respectively:

$$l_{BHE} = \frac{P_{ground}}{n_{BHE} \cdot P_{BHE}}$$

where: P_{ground} = heat pump evaporator capacity in W

P_{BHE} = specific heat extraction rate in W/m

l_{BHE} = (average) length of one BHE in m

n_{BHE} = number of BHE.

De specifieke onttrekkingsvermogens (P_{BHE}) situeren zich in de grootteorde tussen de 30 en 70 W/m afhankelijk van de thermische geleidbaarheid van de bodem. Hiervoor wordt verwezen naar de tabel A.3 in de EN 14540: Verwarmingssystemen in gebouwen – Ontwerp van warmtepomp-verwarmingssystemen (zie bijlage 1).

Men berekent vervolgens de gemiddelde boorlengte op basis van het mogelijk aantal wisselaars of omgekeerd, het aantal wisselaars wordt berekend op de maximaal toelaatbare of economisch rendabele lengte.

voorbeeld

gegevens:

- P_{heating} = verwarmingscapaciteit van de warmtepomp in W of kW = 12 kW
- $\text{SPF} = 4$
- gemiddeld aantal vollasturen: 1800 uren/jaar
- type grond: verzadigde zandbodem $\rightarrow P_{\text{BHE}} = 65 \text{ W/m}$ (zie tabel in bijlage)
- n_{BHE} : aantal lussen : 2

$$\rightarrow P_{\text{ground}} = \frac{12}{4} \times (4 - 1) = 9 \text{ kW}$$

$$\rightarrow l_{\text{BHE}} = 9000 \text{ W} - (2 \times 65 \text{ W/m}) = 69 \text{ m}$$

3.1.2 Methoden op basis van correctiefactoren

Voor beperkte projecten wordt gebruik gemaakt van methoden die de totale lengte van de bodemwarmtewisselaars corrigeert op basis van een aantal parameters.

De Nederlandse methode conform de ISSO 73 '*Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars*' en de Zwitserse methode conform de SIA 384/6 zijn methoden gebaseerd op correctiefactoren.

De ISSO 73 houdt rekening met:

- Het equivalent aantal vollasturen
- Het aandeel regeneratie
- De warmtegeleiding van de bodem (de bodemklasse)
- Het vulmateriaal
- De mediumtemperatuur
- Het type bodemwarmtewisselaar
- De opstellingsvorm van de bodemwarmtewisselaars
- De onderlinge afstand tussen de bodemwarmtewisselaars

De Zwitserse methode SIA 384/6 baseert zich op:

- De bodemoppervlaktetemperatuur op basis van hoogte boven de zeespiegel
- De gewogen gemiddelde warmtegeleidbaarheid wordt bepaald op basis van de ondergrond en aanbevolen tabelwaarden. Er wordt aanbevolen om conservatieve waarden te hanteren
- Het aantal vollasturen
- De bodemtemperatuur

3.2 Complexe systemen

Voor complexe systemen met een piekvermogen groter van 30kW en/of met een aantal vollasturen meer dan 2400 uren, worden softwarepakketten aangewend die op basis van een gedetailleerde opgave van de eigenschappen van de bodem, de bodemwarmtewisselaars, het fluïdum en vooral de warmte en koudevraag van het gebouw een langetermijninschatting maken van het minimum en maximum temperatuur van het fluïdum en de bodem.

Het numerieke simulatiemodel van deze softwarepakketten is veelal gebaseerd op de g-functies. Deze functies beschrijven de onderlinge invloed van de verschillende bodemwarmtewisselaars in een specifieke configuratie van een boorveld. Deze beïnvloeding wordt belangrijker na verloop van tijd dat de installatie in dienst is, de afstand tussen de individuele bodemwarmtewisselaars verkleind en de onttrokken hoeveelheid energie toeneemt.

Energy Earth Designer (EED) is courant gebruikt programma.

3.2.1 Energy Earth Designer (EED)

Om de dimensionering volgens EED te kunnen berekenen moeten volgende gegevens worden verzameld:

- Bodem:
 - Thermische geleidbaarheid
 - Volumetrische warmtecapaciteit
 - Oppervlaktetemperatuur
 - Geothermische warmteflux

- Boorgat en de bodemwarmtewisselaar:
 - Type bodemwarmtewisselaar
 - Configuratie
 - Diepte (indien dit een vastgesteld gegeven is)
 - Tussenafstand
 - Boorgatdiameter
 - Debiet fluïdum
 - Contactweerstand bodem/buis
 - Buisgegevens (type, thermische geleidinggeleidbaarheid, diameter, wanddikte, afstand tussen de heen en retour van de bodemwarmtewisselaar
 - Thermische geleidbaarheid vulmateriaal

- Fluidum (warmtedragend medium):
 - Thermische geleidinggeleidbaarheid
 - Soortelijke warmtecapaciteit
 - Dichtheid
 - Viscositeit
 - Vriespunt
 - minimum en maximum gemiddelde mediumtemperatuur

- belasting:
 - SPF voor verwarmen en koelen
 - energiebehoefte voor verwarmen en koelen per maand
 - piekbelasting en duur verwarmen en koelen
 - simulatieperiode
 - maand van indienststelling

3.2.2 Ontwerpmethodiek voor complexe installaties

In de volgende figuur 'de ontwerpmethodiek', worden de verschillende stappen in het ontwerp voorgesteld.

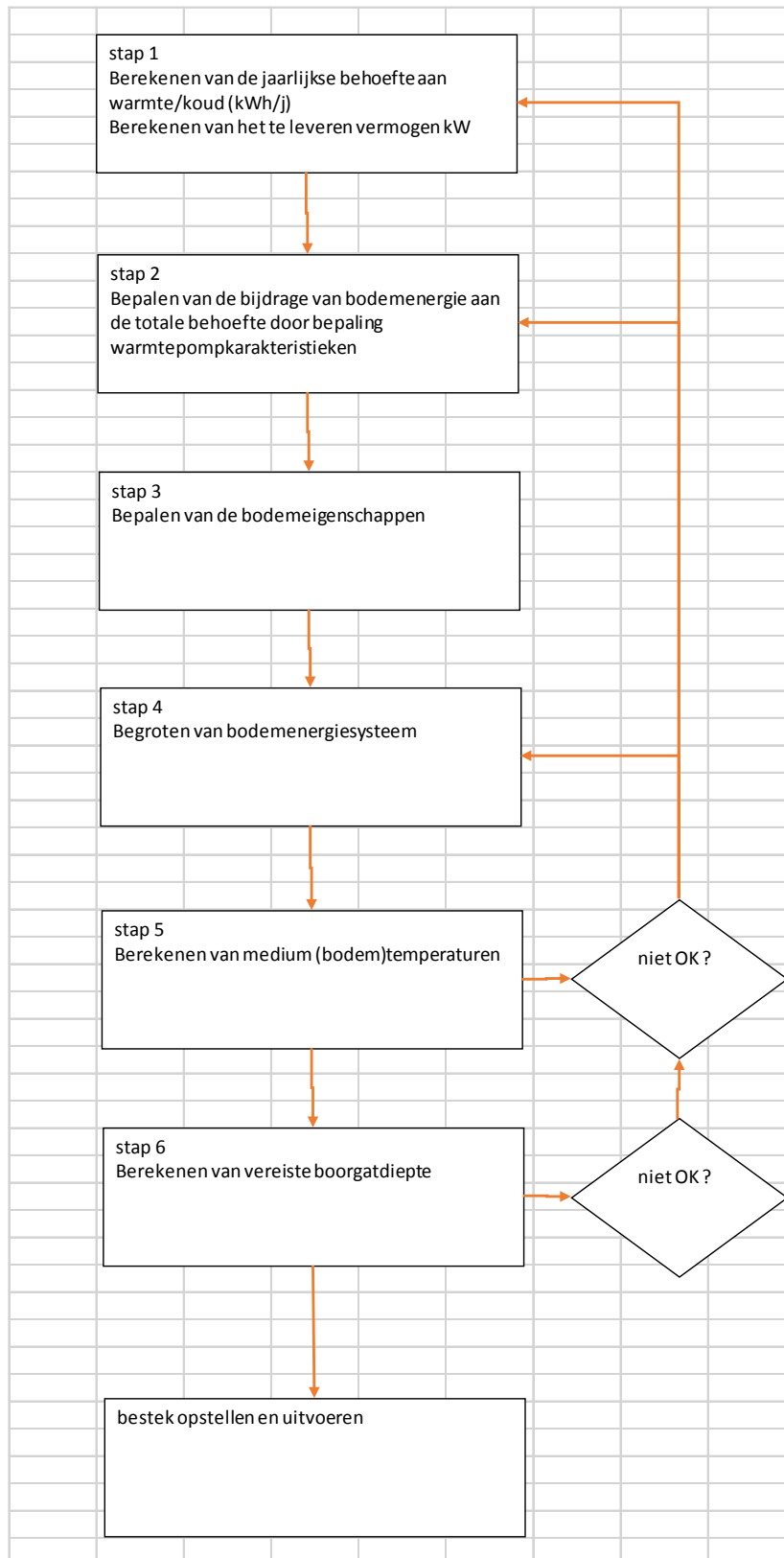
Het ontwerp van het gebouw, het gebruik en de locatie bepalen de jaarlijkse energiebehoefte en het benodigde vermogen (Stap 1). Op basis hiervan wordt in de volgende stap (Stap 2) de bijdrage begroot die door de warmtepomp en de bodem moet worden geleverd. De bedrijfsmodus, het vermogen en de COP van de warmtepomp worden hierdoor voorlopig bepaald.

Tijdens stap 3 worden de bodemeigenschappen achterhaald van de locatie van het bouwproject. De ontwerper zal in stap 4 de configuratie van het bodemenergiesysteem voorlopig vastleggen zodat op basis hiervan en de gevraagde behoefte aan bodemenergie uit stap 2 de invloed op de bodemtemperatuur na een bepaalde periode kan worden berekend. Indien deze niet voldoet aan de vereisten, dienen ofwel parameters van bodemenergiesysteem worden herzien of wordt de behoefte aan bodemenergie in stap 2 of desnoods stap 1 opnieuw bepaald.

Eenzelfde oefening dient de ontwerper te maken indien de vereiste boorgatdiepte uit stap 6 niet haalbaar omwille van bijvoorbeeld vergunningsredenen.

Tenslotte wordt de beslissende parameters in een bestektekst vastgelegd zodat de uitvoerder van het bodemenergiesysteem deze in acht kan nemen tijdens de voorbereiding, uitvoering en controle van de werkzaamheden.

De verschillende stappen komen verder diepgaander aan bod.



Figuur 21: flowchart ontwerpmethodiek

3.3 Bepaling van de behoefte aan thermische energie

Elk gebouw vereist een bepaald comfortniveau, heeft een typisch gebruikersprofiel, zijn eigen ontwerpkenmerken, isolatie, EPB-eisen en externe omstandigheden.

Inputparameters voor de verdere berekeningen zijn dan ook de gewenste binnentemperaturen en de ontwerpbuitemperaturen

Voor het ontwerp van een grondgekoppelde installatie moet er rekening gehouden worden met het piekvermogen (korte termijn) en de totale energievraag van het verwarming- en koelsysteem (lange termijn). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van jaarlijkse energievraagprofielen, die men kan bekomen door berekeningen gebaseerd op normen. Voor grote installaties is het nodig deze gegevens minstens op maandbasis te berekenen, idealerwijs zelfs op uurbasis.

Gewenste binnentemperaturen

Voor de bepaling van de gewenste binnentemperatuur baseert men zich op de NBN EN 15251 *Binnenmilieu-gerelateerde inputparameters voor ontwerp en beoordeling van energieprestatie van gebouwen voor de kwaliteit van binnenlucht, het thermisch comfort, de verlichting en akoestiek*. Deze norm geeft de operationele temperaturen weer in functie van het type gebouw en lokaalbestemming en beschrijft bovendien de aanpassing van deze binnentemperaturen in functie van de heersende buitemperatuur.

Ontwerpbuitemperaturen

In de norm nationale bijlage van de norm NBN EN12831 werden de ontwerpbuitemperaturen voor België vastgelegd.

Voor de koellastberekening zijn er tabellen beschikbaar die de gemiddelde buitemperatuur tijdens een referentiezomermaand per uur van de dag en per locatie weergeven.

Warmteverliesberekening

De warmteverliesberekening kan plaatsvinden op basis van de NBN EN12831. Het warmteverlies is de energie die nodig is om een gebouw op een gewenste binnentemperatuur te houden onder bepaalde winterse buitemperaturen.

Koellastberekening

De koellast wordt bepaald op basis van de interne en externe warmtebelasting die aan het gebouw worden opgelegd.

De externe belasting is het gevolg van de zonnewarmte die via straling, transmissie en ventilatie het gebouw binnendringt.

Interne warmte wordt gecreëerd door de aanwezigheid van mensen, machines, verlichting enz.

Thermische energieopslag

Het is belangrijk om de thermische inertie van het gebouw en zijn ruimten mee in ogenschouw te nemen bij de berekening van het totale thermische vermogen voor het koelen en verwarmen van het gebouw. In zomerse omstandigheden wordt een teveel aan thermische energie overdag opgenomen in de gebouwstructuur, waardoor pieken in koellast worden vermeden. Deze gebufferde thermische energie wordt gedurende de nacht opnieuw vrijgegeven als de ruimtetemperatuur is gedaald. Door nachtventilatie kan men deze vrijgave bevorderen.

Een bijzondere wijze van thermische energieopslag is betonkernactivering. In een structureel element zoals een vloer of wand is een leidingnetwerk voorzien waardoor water stroomt. Het water wisselt de opgeslagen energie uit en voert deze af naar de bodem om ze daar voor een langere termijn op te slaan.

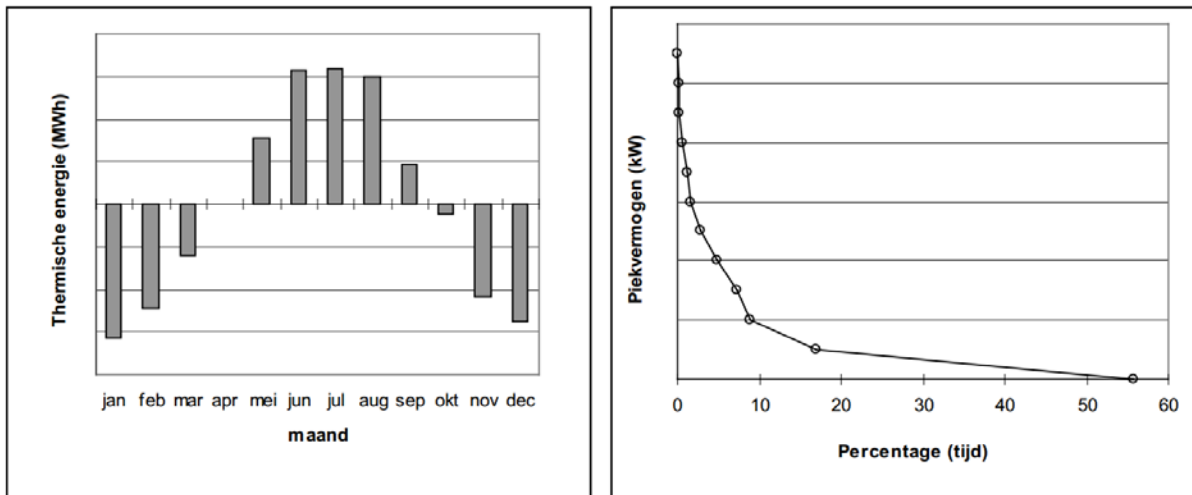
Betonkernactivering vormt niet alleen een thermisch opslagsysteem, maar ook een warmte-afgiftesysteem. Afhankelijk van de temperatuur van dit medium, zal de oppervlaktetemperatuur van het structurelement uiteindelijk stijgen of dalen. Als de ruimtetemperatuur hoger is dan het betonoppervlak, neemt het beton de warmte op, waardoor de ruimte afkoelt. Het koel- en verwarmingsvermogen van dit systeem is niet alleen afhankelijk van de temperatuur van het water, maar ook van de warmtecapaciteit van het medium, het debiet, de verdeling en plaats van de kanalen/leidingen enz. Door het feit dat gebruik wordt gemaakt van grote stralende oppervlakken (vloeren/plafond/wanden) kan betonkernactivering functioneren bij kleine verschillen tussen de ruimtetemperatuur en de oppervlaktetemperatuur van de geactiveerde elementen.

Door deze zeer lage temperatuurverwarming (ZLTV) en hoge temperatuurskoeling (HTK) kan een warmtepomp en natuurlijke koeling op een zeer efficiënte wijze worden toegepast.

Dynamische simulaties zijn in dit geval nodig om het echte energiebehoefteprofiel te kennen van een gebouw.

Energieprofielen

De resultaten van de berekeningen kunnen voorgesteld worden in de vorm van een maandelijkse behoefte aan energie en/of door middel van een jaarbelastingsduurcurve. Deze curve geeft aan hoeveel procent van de tijd een bepaald piekvermogen nodig is om de energiebehoefte van het gebouw te kunnen dekken.



pieklast-duurkromme (rechts).

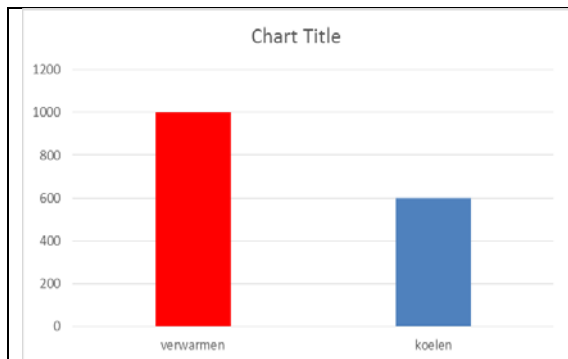
Figuur 22: belastingsduurcurve, Bron: Kwaliteitsrichtlijn Verticale Bodemwarmtewisselaars

3.4 Thermische behoefte uit de bodem

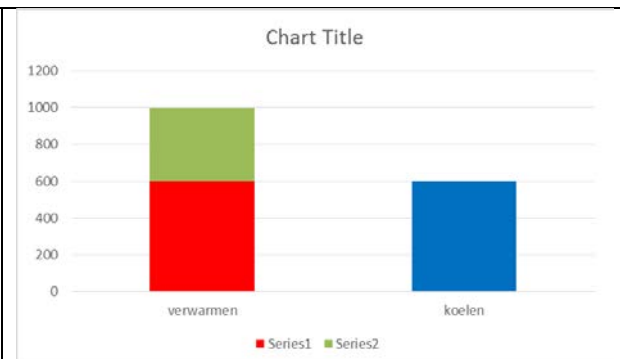
Belangrijk voor een ontwerper van geothermische installatie is het streven naar een thermische balans in de bodem. Hiervoor zal hij op jaarbasis evenveel thermisch energie naar de bodem brengen als hij heeft onttrokken.

Volgende scenario's kunnen zich hierbij voortdoen, waarbij de ontwerper beroep kan doen op verschillende oplossingen of een combinatie van oplossingen.

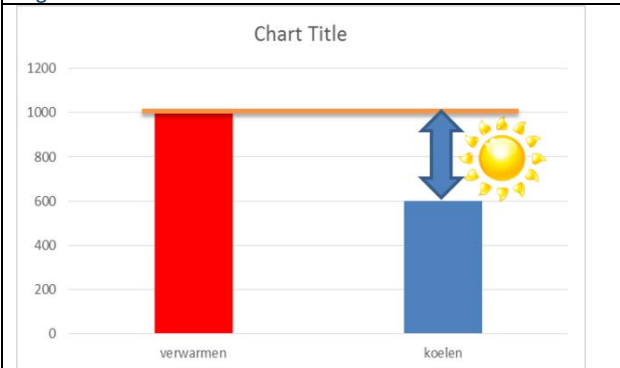
3.4.1 De behoefte aan verwarming is groter dan de behoefte aan koeling.



Figuur 23: energiebehoefte verwarmen > koelen



Figuur 24: scenario 1a



Figuur 25: scenario 1b

Scenario 1a.

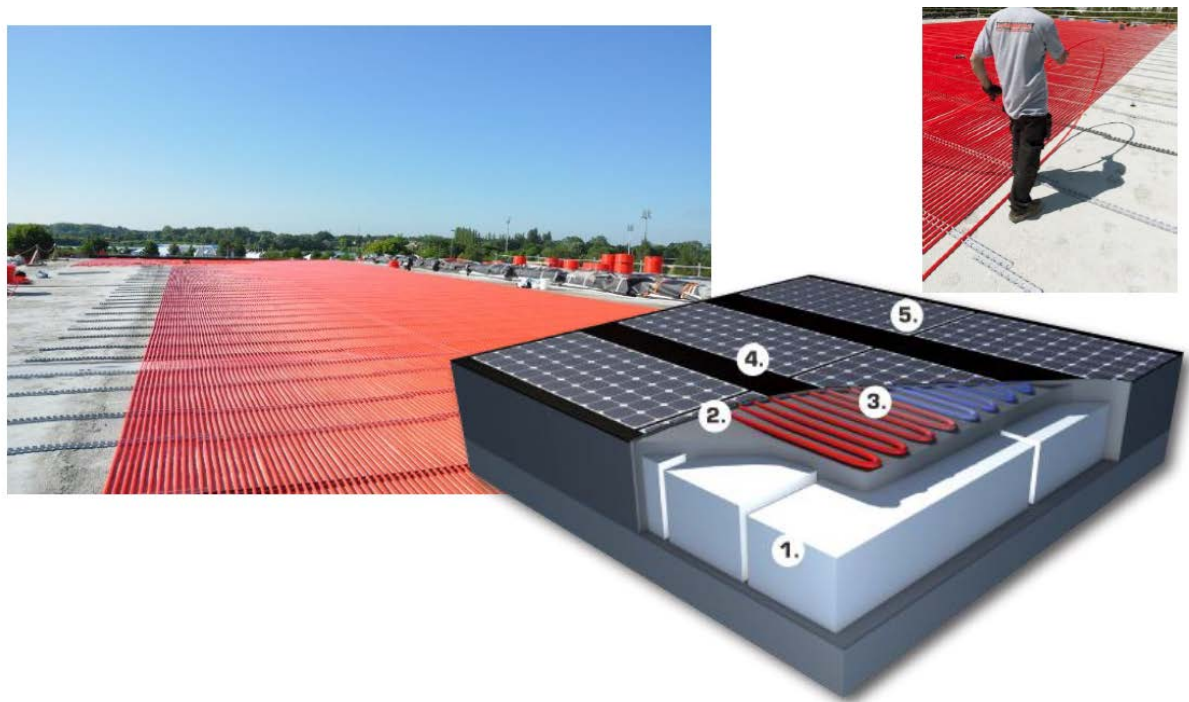
Het aandeel bodemenergie voor verwarming wordt begroot op basis te leveren koelenergie zodat er op jaarbasis een evenwicht ontstaat. Het verschil tussen verwarmings- en koelbehoefte (het groene deel op de figuur) wordt geleverd door een andere installatie (monovalent en bivalente bedrijfsmodus)

Scenario 1b.

De bodem wordt maximaal benut voor het leveren van warmte. Het tekort aan thermische energie dat hierdoor ontstaat op jaarbasis wordt terug aangevuld met thermische energie afkomstig van zonne-energie of andere bronnen van (industriële) restwarmte.

De zonne-energie kan geleverd door klassieke zonnecollectoren waarbij het teveel aan zonne-energie tijdens de zomermaanden via het bodemenergiesysteem naar de ondergrond wordt afgevoerd.

Andere bronnen van thermische energie kunnen zijn zonthermische daken, warmtewingevels, en wegecollectoren.



Figuur 26: zonthermisch dak, zwembad de Nekker te Mechelen

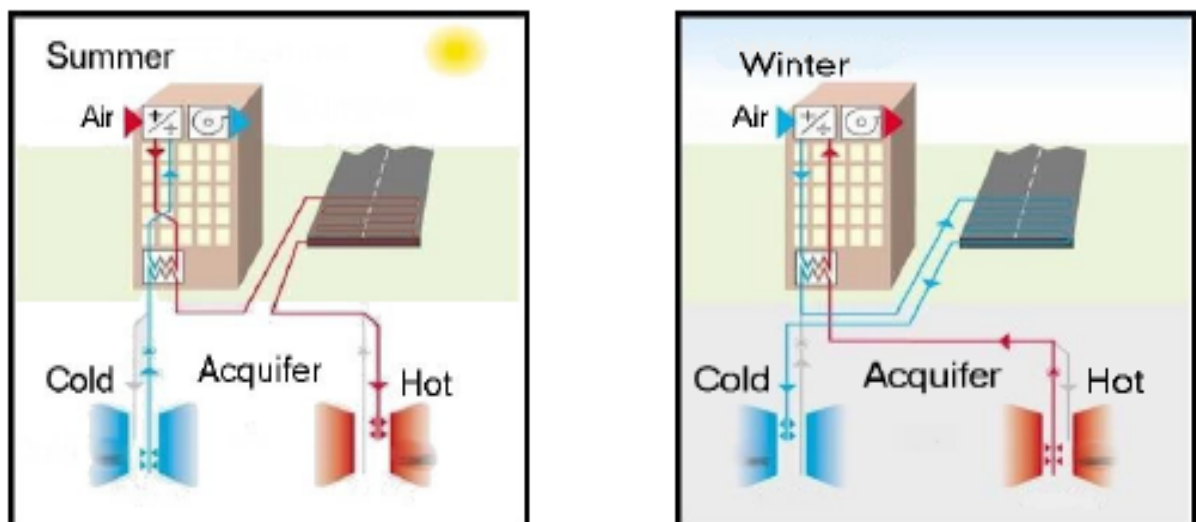


Figuur 27: warmtewingeval, bron Jansssen de Jong Bouw



Figuur 28: wegencollectoren

Wegencollectoren capteren zonne-energie tijdens de zonnige periode en slaan deze op in de bodem. Deze thermische energie kan dan tijdens de vorstperiode gebruikt worden om de weg ijsvrij te houden voordat ze aangewend wordt om het gebouw te verwarmen.

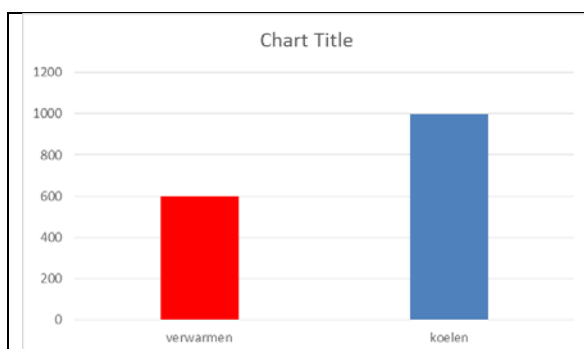


Figuur 29: schema voor wegencollectoren

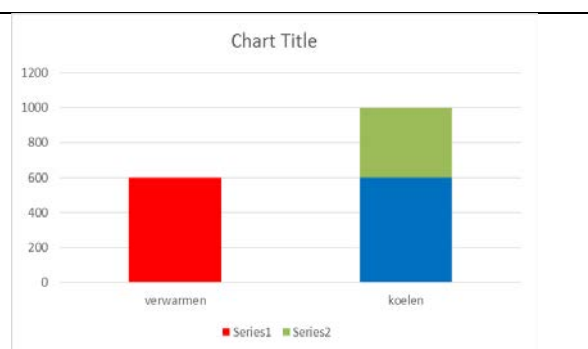


Figuur 30: collectoren in rioleringsbuizen om restwarmte te recupereren

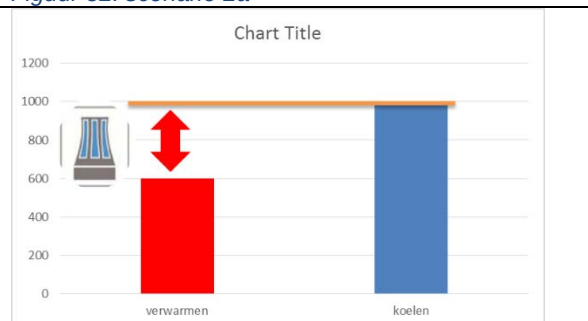
3.4.2 De behoefte aan koeling is groter dan de behoefte aan verwarming



Figuur 31: behoefte aan koelen > verwarmen



Figuur 32: scenario 2a



Figuur 33: scenario 1b

Scenario 2a.

De behoefte aan bodemenergie voor koeling wordt afgesteld om de behoefte om te verwarmen. De resterende koelbehoefte wordt voorzien door conventionele koelsystemen.

Scenario 2b

Het bodemenergiesysteem wordt berekend op het te leveren koude. Om de bodemtemperatuur op jaarbasis niet te laten stijgen, wordt extra koude door bijvoorbeeld het gebruik van koeltorens naar de bodem geleid.

3.4.3 Het aandeel bodemenergie t.o.v. de totale energiebehoefte

Zoals besproken in paragraaf 1.5.5 (bedrijfsmodi van warmtepompen) is het zeker voor grote projecten niet noodzakelijk (zelfs niet aangewezen) dat het berekende piekvermogen volledig door het bodemenergiesysteem moet worden geleverd.

Veelal wordt als uitgangspunt het bodemenergiesysteem begroot op 50% van het totale piekvermogen.

3.5 De thermische bodemeigenschappen

3.5.1 Thermisch gedrag van de ondergrond

Als er warmte onttrokken wordt via een bodemwarmtewisselaar, zal plaatselijk een zone ontstaan met een lagere temperatuur.

De hoeveelheid energie die men per tijdseenheid (d.i. het vermogen) aan de bodem kan onttrekken en de snelheid waarmee de bodemtemperatuur zich terug herstelt, zijn afhankelijk van een aantal factoren:

- De thermische geleidbaarheid
- De warmtecapaciteit
- De temperatuursverffeningsscoëfficiënt
- De geohydrologie
- De initiële bodemtemperatuur

Deze factoren zullen verder in detail worden besproken.

3.5.2 Thermische geleidbaarheid van de bodem

Definitie

De thermische geleidbaarheid λ (W/m.K) beschrijft hoe goed een medium warmte geleidt tussen twee plaatsen met een verschillende temperatuur. Deze energieoverdracht verloopt van de warme naar de koude plaats door moleculaire interacties ten gevolge van het verschil in kinetische energie.

Voor grond is de thermische geleidbaarheid afhankelijk van de mineralogische samenstelling (bijv. kwarts, kleimineralen), de porositeit, de verzadigingsgraad en de temperatuur. Zo zal de thermische geleidbaarheid afnemen bij toenemende porositeit (poriënvolume). De thermische geleidbaarheid zal echter toenemen, maar het effect wordt gereduceerd wanneer de poriën verzadigd zijn met water (De Coster, 2010)

De thermische geleidbaarheid varieert van 1.2 W/m.K voor kleigronden tot 2.4 W/m.K voor waterverzadigde zandgronden.

De thermische geleidbaarheid van de bodem heeft een grote impact op de dimensionering van een boorveld. Een hoge thermische geleidbaarheid betekent een snel transport van energie naar de bodemwarmtewisselaar. Voor een goed ontwerp is het belangrijk om de actuele waarde zo dicht mogelijk te benaderen aan de conservatieve zijde, m.a.w. een thermische geleidbaarheid die een beetje lager ligt dan de actuele en met hoge zekerheid voldoet aan de werkelijke waarde.

Bepaling thermische geleidbaarheid

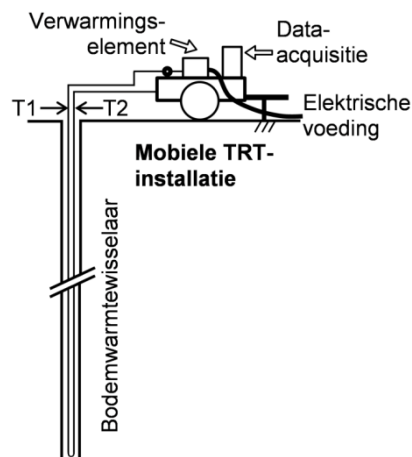
Omdat de thermische geleidbaarheid afhankelijk is van de grondsoort (zand, klei,...) zal de gemiddelde thermische geleidbaarheid afhankelijk zijn van de opeenvolging van verschillende lagen van die grondsoort en de dikte van die lagen op een bepaalde locatie.

Men kan de gemiddelde thermische geleidbaarheid over een bepaalde boordiepte bepalen door een Thermische Respons Test (TRT) uit te voeren.

Voor een eerste ontwerpfase of voor een beperkt systeem kan men een schatting van de gemiddelde thermische geleidbaarheid maken op basis van geschiktheidskaarten.

Thermische Respons Test

Voor grotere en complexe systemen moet een Thermische Respons Test (TRT) in situ worden uitgevoerd. De test resulteert in de thermische geleidbaarheid, λ , van de grond over de volledige sondelengte, mogelijk beïnvloed door de effectieve grondwaterstroming. Daarnaast kan uit een TRT ook de thermische weerstand van de boorgatwarmtewisselaar, R_b , bepaald worden.



Via een bodemwarmtewisselaar wordt warmte aan de ondergrond afgegeven. Door de meting van de in- en uitgangstemperatuur van het circulerende fluïdum, wordt de snelheid bepaald waarmee deze warmte wordt afgegeven waardoor de thermische geleidbaarheid kan worden berekend. De klassieke TRT geeft een gemiddelde waarde van de warmtegeleidbaarheid over de volledige diepte van de bodemwarmtewisselaar. De 'Distributed TRT' (DTRT) en 'Enhanced TRT' (ETRT) zijn daarentegen in staat een meer gedetailleerd beeld te geven van de warmtegeleidbaarheid en de boorgatweerstand in functie van de diepte

Figuur 34: TRT meetopstelling

Geschiktheidskaarten

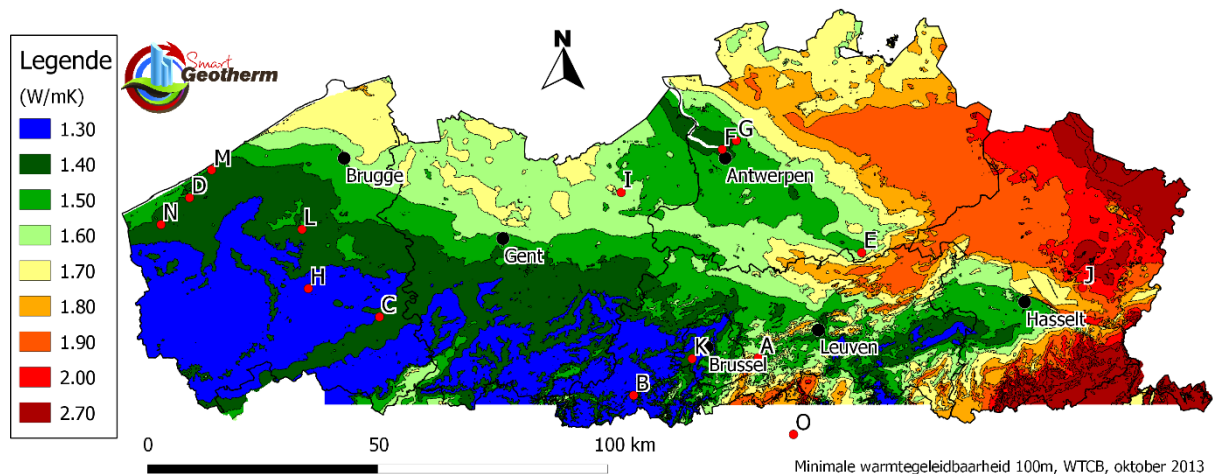
Men kan een inschatting maken van de thermische geleidbaarheid op een bepaalde locatie en voor een bepaalde boordiepte op basis van de dikte van de verschillende lagen en de respectievelijke thermische geleidbaarheden.

De gemiddelde thermische geleidbaarheid van de ondergrond over een diepte van bijvoorbeeld 100 meter wordt dan als volgt berekend:

$$\lambda_{gem,100m} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (1)$$

Met n het aantal verschillende lagen tot op een diepte van 100 meter en L en λ respectievelijk de dikte en de thermische geleidbaarheid van elke laag.

Deze berekeningsmethode gekalibreerd met resultaten van beschikbare TRT's leiden voor Vlaanderen tot volgende kaart. Voor specifieke locaties en welbepaalde diepten kan met gebruik van de screeningstool die beschikbaar is op <http://tool.smartgeotherm.be/alq>



Figuur 35: Voorbeeld van geschiktheidskaart voor Vlaanderen tot op een diepte van 100 m

3.5.3 Warmtecapaciteit

Definitie

De warmtecapaciteit, c (J/K), is het vermogen van een medium (vaste stof, vloeistof, gas) om energie onder de vorm van warmte op te slaan. Deze eigenschap wordt uitgedrukt als de hoeveelheid warmte nodig om de temperatuur van het medium met één graad te verhogen.

Vaak wordt gesproken van de specifieke of soortelijke warmtecapaciteit, c_p (J/kg.K), die de hoeveelheid warmte weergeeft nodig om de temperatuur van een medium met eenheidsmassa met één graad te verhogen (op constante druk).

De volume gerelateerde warmtecapaciteit, ρc_p (J/m³.K), wordt ook veelvuldig gebruikt (constant volume). De volume gerelateerde warmtecapaciteit is de hoeveelheid warmte (J)

die aan een medium met eenheidsvolume (m^3) moet toegevoegd worden om de temperatuur ervan met één graad (K) te laten toenemen.

Bepaling warmtecapaciteit

De warmtecapaciteit komt voor in formules voor de berekening van de boorgatweerstand uit Thermische Respons Test. Typische waarden voor de volume gerelateerde warmtecapaciteit, ρc_p , van grond (klei tot zand) variëren tussen 2.0 en 3.4 MJ/ m^3/K . De fout die geïntroduceerd wordt in de berekende boorgatweerstand door de aangenomen waarde van ρc_p is echter beperkt in vergelijking met fouten veroorzaakt door andere parameters zoals de warmtegeleidbaarheid (Witte, Error analysis of thermal response test (Extended version), 2012). Om deze reden wordt meestal een literatuurwaarde aangenomen in plaats van de warmtecapaciteit in het laboratorium te bepalen. Zie tabel in bijlage uit de VDI 4640 (VDI, 2000)

3.5.4 Temperatuurvereffeningscoëfficiënt of warmtediffusiviteit, α (m^2/s)

De temperatuursvereffeningscoëfficiënt of warmtediffusiviteit wordt als volgt berekend:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \text{ (m}^2/\text{s) met:}$$

λ de thermische geleidbaarheid ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$) en ρc_p de volume gerelateerde warmtecapaciteit ($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$).

Het is in zekere zin een maat voor de thermische inertie van een materiaal en is een essentiële parameter voor de karakterisatie van transiënt warmtetransport.

Een lage warmtegeleidbaarheid, λ , verlaagt de warmtediffusiviteit, α , en bijgevolg de snelheid waarmee het voorwerp opwarmt of afkoelt.

De warmtediffusiviteit, α , neemt af als er meer energie (warmte) moet toegevoegd worden aan het lichaam om de temperatuur ervan te veranderen (of dus voor een hogere waarde voor de volume gerelateerde warmtecapaciteit, ρc_p).

Omdat de aanwezigheid van water de thermische geleidbaarheid verhoogt, zal dus ook de warmtediffusiviteit stijgen.

3.5.5 Geohydrologie

Voor het ontwerp van een bodemwarmtewisselaarsysteem kan de stroming van het water in de bodem (geohydrologie) op een locatie van groot belang zijn.

Een sterke grondwaterstroming kan de plaatselijk opgeslagen thermische energie in de bodem verplaatsen zodat deze energie meer slechts gedeeltelijk kan worden herwonnen.

Een sterke grondwaterstroming kan anderzijds een positieve invloed hebben bij de natuurlijke regeneratie van een bodemenergiesysteem met een thermisch onbalans. De bodem zal sneller de oorspronkelijke bodemtemperatuur aannemen.

Geohydrologie wordt in het Vlaams Gewest in kaart gebracht door de Vlaamse Milieumaatschappij. Aan de hand van in kaart gebrachte peilputten (via viewer van <http://dov.vlaanderen.be>) en geregistreerde wateronttrekkingen in de buurt kan een idee gegeven worden van de hydrologie.

Voor het Waals Gewest kan men te rade gaan op de volgende website:
http://geoportail.wallonie.be/geocatalogue?search-theme=theme_10&search-subtheme=soustheme_1030#

Voor het Brussels gewest is er voorlopig geen website met geohydrologische kaarten of informatie ter beschikking.

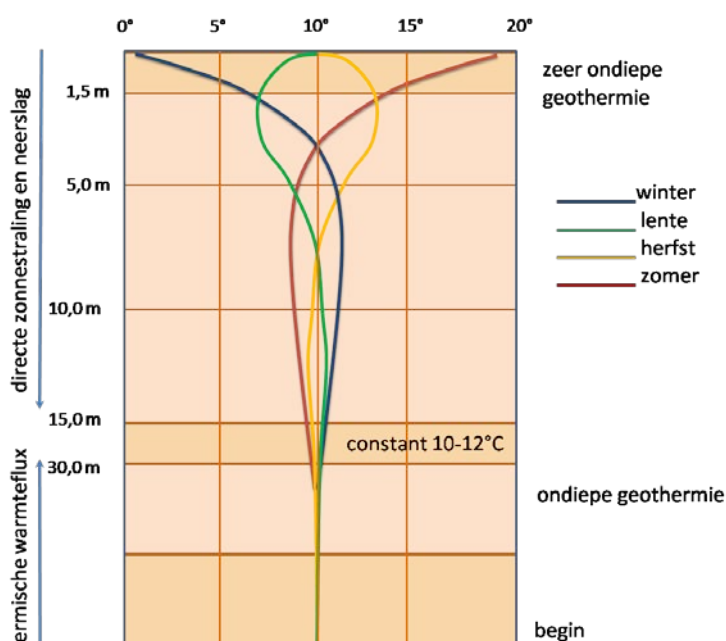
Indien belangrijke waterstromingen worden vermoed, worden peilbuizen aangebracht in de betreffende watervoerende lagen om de grondwaterstroming te monitoren.

Bij een verwachte effectieve grondwaterstroming van meer dan 5m/jaar is een gedetailleerde studie van het effect van de grondwaterstroming op de temperatuur aan te bevelen op basis van software (vb. Modflow)

3.5.6 Bodemtemperatuur en warmteflux

De (ongestoorde) bodemtemperatuur is de gemiddelde temperatuur van de ondergrond waarin de bodemwarmtewisselaar wordt geïnstalleerd.

Tot een diepte van +/- 10 meter is deze temperatuur niet alleen afhankelijk van de locatie en het type ondergrond maar ook van het seizoen. De variatie van deze temperatuur heeft weinig invloed op het ontwerp van het boorveld omdat ze procentueel een kleine lengte vertegenwoordigt.



Figuur 36: temperatuurverloop in bodem (herhaling)

Op grotere diepte verhoogt de temperatuur met 2 à 3 graden per 100 meter..

De gemiddelde jaartemperatuur is in principe een goede weerspiegeling van de bodemtemperatuur.

In stedelijke gebieden blijkt echter dat de bodemtemperatuur gevoelig hoger kan liggen (2.5 à 3.5°C) dan bij landelijke gebieden. In stedelijke gebieden komt men vaak een invers temperatuurprofiel tegen. De temperatuur neemt af met toenemende diepte om pas op grotere diepte weer toe te nemen. (Buik, 2004)

De gemiddelde bodemtemperatuur wordt bepaald bij aanvang van een Thermische Responstest door het dragermedium gedurende bepaalde tijd te laten rondcycleren en vervolgens de temperatuur op te meten.

Tabel 2: warmteflux (W/m²) bron EED

BELGIUM	
Antwerpen	0.070
Brussels	0.080
Gent	0.080
Spa	0.060
St.Hubert	0.060

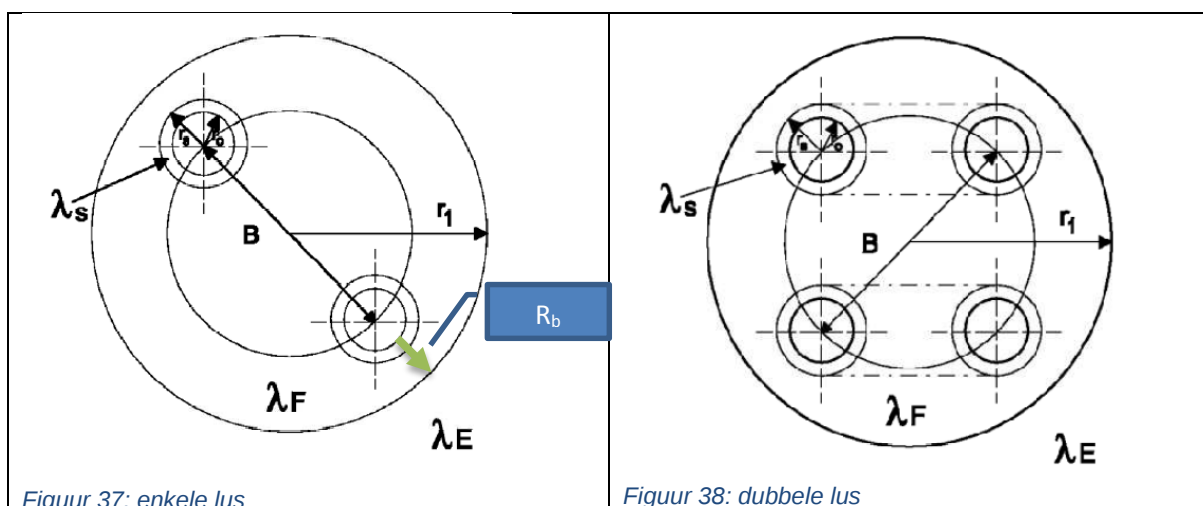
Tabel 3: temperatuur aardoppervlak (°C) bron EED

BELGIUM	
Antwerpen	9.6
Brussels	9.7
Gent	9.5
Spa	7.4
St.Hubert	6.8

3.6 Het bodemenergiesysteem

3.6.1 Boorgatweerstand

De boorgatweerstand R_b (mK/W) is een empirische grootheid die de thermische weerstand weergeeft tussen het circulerend fluïdum in de bodemwarmtewisselaar en de wand van het boorgat.



R_b : boorgatweerstand
 λ_s : thermische geleidbaarheid bodemwarmtewisselaar
 λ_f : thermische geleidbaarheid opvulmateriaal
 λ_E : thermische geleidbaarheid grond

r_1 : straal boorgat
 r_i : binnenstraal bodemwarmtewisselaar
 r_a : buitenstraal bodemwarmtewisselaar
 B : afstand hart op hart tussen twee benen van bodemwarmtewisselaar

De boorgatweerstand is gerelateerd aan verschillende parameters, waaronder (CEN/TC 341 N525, 2011):

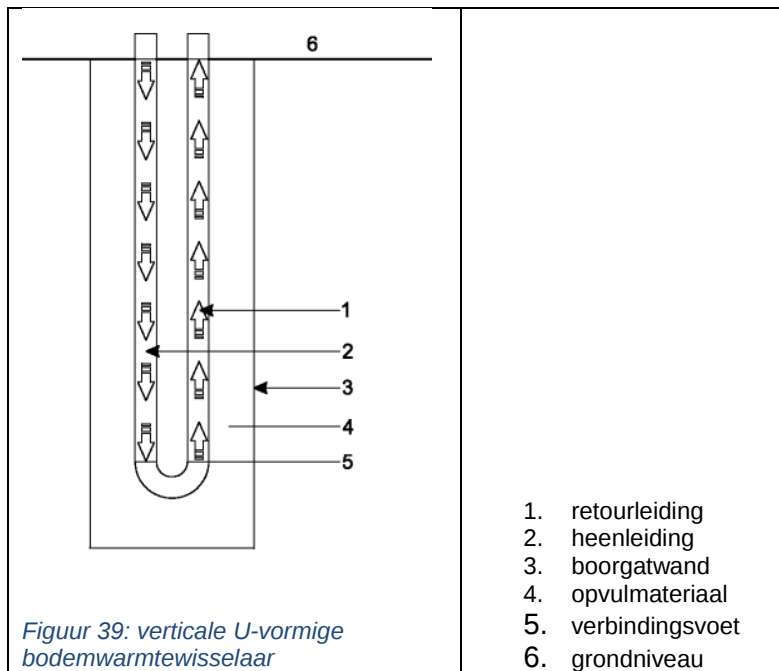
- Eigenschappen bodemwarmtewisselaar (materiaal (λ_f), diameter (r_i), wanddikte ($r_a - r_i$))
- Configuratie van de bodemwarmtewisselaars (enkele of dubbele U-lus)
- Opvulmateriaal (λ_f)
- Afstand tussen de buizen van de bodemwarmtewisselaars (B)
- Boorgatdiameter (r_1)
- Eigenschappen fluïdum
- Stromingsregime

De boorgatweerstand varieert tussen 0.08 mK/W voor zeer goed presterende bodemwarmtewisselaars tot 0.25 mK/W voor zeer slechte presterende bodemwarmtewisselaars. Hierbij zijn het stromingsregime in de bodemwarmtewisselaar en de warmtegeleidbaarheid van het opvulmateriaal de belangrijkste parameters. (Groenholland, 2013)

3.6.2 Bodemwarmtewisselaars

3.6.2.1 Beschrijving

Verticale bodemwarmtewisselaars zijn gesloten systemen met buizen die verticaal tot een diepte van bijv. 100 meter of meer in de grond aangebracht worden. Door de buizen stroomt een vloeistof (fluïdum) dat opgewarmd of afgekoeld wordt door de bodem.



De bodemwarmtewisselaar bestaat uit een enkelvoudige of dubbele U-vormige lus.

Een dubbele U-lus heeft een opbrengst die 15 à 20 % hoger ligt dan een enkelvoudige bodemwarmtewisselaar.

3.6.2.2 Materiaaleisen

De leidingen die worden ingebouwd, bestaan uit materialen die niet reageren met de ondergrond en het grondwater waarin ze worden ingebracht en die een voldoende levensduur hebben in het geïnstalleerde milieu.

Het materiaal dat ondergronds wordt gebruikt mag helemaal niet toxisch en moet inert zijn.

Het materiaal moet geschikt zijn voor het gebruikte (gewenste, ontwerp-) temperatuurbereik wanneer de installatie in gebruik is. De levensduur moet minimaal 50 jaar zijn onder de voorkomende bedrijfsomstandigheden en bij gebruik in de bodem. Delen van de bodemwarmtewisselaar die blootgesteld worden aan daglicht, moeten UV bestendig zijn.

Tijdens het inbrengen van de bodemwarmtewisselaar kunnen er krassen ontstaan aan de buitenwand. Hierdoor kunnen lokaal zeer hoge spanningsconcentraties ontstaan met scheurgroei op langere termijn. PE-RC en PE-X hebben een veel hogere weerstand tegen het voortzetten van de scheurgroei dan PE. Zo kan bv. PE-RC voor de notch creep test tot 8760 uren gaan terwijl dit voor PE niet meer is dan 500 uren.

De weerstand tegen scheurvorming wordt bepaald door de Full notch creep test (ISO 16770:2004 Plastics -- Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene -- Full-notch creep test (FNCT)) en wordt uitgedrukt in uren.

3.6.2.3 Materialen

Materialen gebruikt kunnen worden zijn:

- PE100
- PE-XA
- PE 100 RC
- PE-RT

waarvan PE100 en PE-Xa in België momenteel het meest worden toegepast.

Andere materialen kunnen worden aangewend indien hun geschiktheid voor gebruik kan worden aangetoond.

PE100

Polyethyleen met een MRS (minimum required strenght) van 10 MPa.

Het materiaal van de PE100 -bodemwarmtewisselaar moet voldoen aan de NBN EN 12201: PE- Kunststofleidingsystemen voor de drinkwatervoorziening en voor de afvoer en riolering onder druk.

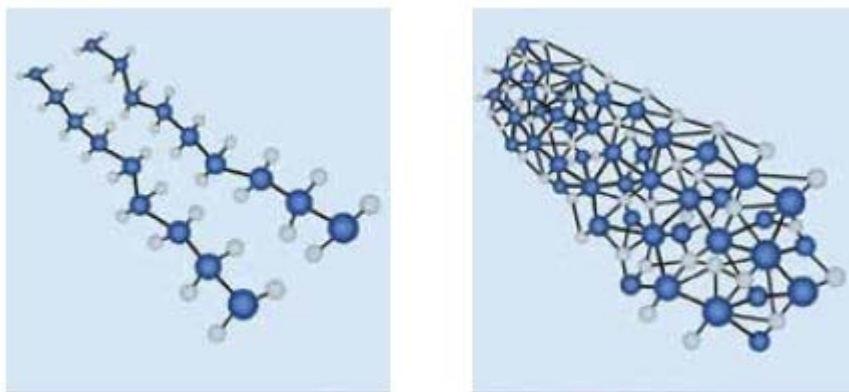
PE-XA

Vernet polyethyleen.

PE-XA bezit een hogere kerfbestandheid en een hoger temperatuurbereik dan PE100.

De minimale straal waarover eenzelfde buis kan worden geplooid is veel kleiner. Door deze laatste eigenschap kunnen bodemwarmtewisselaars uit PE-XA uit één stuk worden vervaardigd zonder gekoppeld te worden ter hoogte van de voet.

De PE-XA bodemwarmtewisselaars moeten voldoen aan de NBN EN 15875-reeks: Kunststofleidingsystemen voor warm- en koudwaterinstallaties - Vernet polyethyleen (PE-X).



Figuur 40: verschil tussen gewone polyethyleen en vernette polyethyleen

Door het vernetten (of chemisch aan elkaar verbinden) van de molecuulketens behoudt men al de oorspronkelijke

eigenschappen en voordelen van polyethyleen en worden er aan het nu gevormde materiaal tevens verschillende nieuwe eigenschappen toegevoegd.

PE100 RC (Polyethyleen Resistant to Crack)

Net zoals de PE-X heeft de PE100 RC een hogere weerstand tegen het voortzetten van een scheur die bijvoorbeeld ontstaat tijdens de in-situ behandeling. In dit geval is het niet te vernetting die bijdraagt tot de hogere weerstand tegen scheurvorming maar de langere PE-kettingen. De andere eigenschappen van de PE100-RC (temperatuursbereik, buigstraal enz) blijven hetzelfde als bij de standaard PE100.

Het materiaal moet voldoen aan de

NBN EN 12201: *PE- Kunststofleidingssystemen voor de drinkwatervoorziening en voor de afvoer en riolering onder druk*

prNBN T 42-116: Kunststofleidingen – PE100 buizen met hoge weerstand tegen trage scheurvoortplanting (PE100-RC buizen) – Eisen en beproevingsmethoden.

PE-RT (type II) , polyethyleen of Raised temperature

Door toevoeging van chemicaliën aan de polyethyleen grondstof haken de moleculen aan elkaar en vergroten hierdoor de sterkte van de buis. Deze 3 lagen buis is zeer flexibel, gemakkelijk te gebruiken en heeft een zeer goede kruipsterkte. Daarnaast hebben de buizen een grote stabiliteit tegen spanningscorrosie.

Het materiaal moet voldoen aan de

NBN EN ISO 22391 Kunststofleidingssystemen voor warm- en koudwaterinstallaties - Temperatuurbestendig polyethyleen (PE-RT)

Overzichtstabel

Materiaal	PE100	PE-XA	PE100-RC	PE-RT type II
Weerstand tegen scheurvorming en puntlasten	Gemiddeld	hoog	Zeer hoog	Hoog
Temperatuursbereik Bij constante doorstroomtemperatuur	-20 – 30°C	-40 – 80 °C	-20 – 30°C	Tot 90°C
Minimale buigstraal bij 0°C	5 x diameter	2 x diameter	5 x diameter	5 x diameter

3.6.2.4 Temperatuurbereik

Het materiaal van de bodemwarmtewisselaar moet geschikt zijn voor een temperatuurbereik van -5 tot 40°C.

3.6.2.5 Drukklassen

De toe te passen drukklasse voor bodemwarmtewisselaars is afhankelijk van de einddiepte. Er kan altijd vanuit gegaan worden dat de minimale waarde voor de toegelaten diepte waarop de buis geplaatst mag worden overeenkomt met het tienvoud van de drukklasse. Dus de maximale diepte voor PN16 is minimaal 160m (PNx10). De maximale diepte wordt berekend door de fabrikant.

Vanaf een diepte van ca. 350 m wordt doorgaans geen PE100 meer toegepast.

Diamètre du tube (mm) DN	SDR	PN	Dext (mm)	e min (mm)	Tolérance (mm)	e max (mm)
25	11	16	25 ⁻⁰ _{+0,3}	2,3	+0,4	2,7
32	11	16	32 ⁻⁰ _{+0,3}	2,9	+0,5	3,4
40	11	16	40 ⁻⁰ _{+0,4}	3,7	+0,5	4,2
40	9	20	40 ⁻⁰ _{+0,4}	4,5	+0,6	5,1

2.9mm moet
vervangen
worden door
3.0mm

Tabel 4: vereiste drukklassen voor courante diameters voor PE100-buizen volgens NBN EN 12201,

Bij temperaturen boven 20°C worden de toegelaten drukspanningen voor PE100-buizen gereduceerd volgens de bijlage A van NBN EN 12201-1, rekening houdend met de ontwerptemperaturen van het fluïdum (zie verder)

Materiaal	Reductiefactoren voor de temperaturen:		
	20 °C	30 °C	40 °C
PE 100	1	0,87	0,74

Tabel 5: reductiefactoren voor gebruik van PE100 bij temperaturen hoger dan 20°C

Voor PE X-leidingen wordt een PN15 drukklasse angewend. Tot een temperatuur van 40°C wordt geen reductiecoëfficiënt toegepast.

3.6.2.6 Diameter en wanddikte

Standaard wordt de SDR 11 –reeks toegepast voor PE-buizen.

De standaarddiameters van buizen met hun bijhorende minimale wanddikten (mm) zijn:

DN 20/2.0, DN25/2.3, DN32/3.0 en DN40/3.7.

3.6.2.7 Markering

De bodemwarmtewisselaar dient te zijn gemerkt met minimaal de volgende gegevens: nummer van de norm, typeaanduiding (vb PE100), fabricagedatum, drukklasse (vb PN 16), diameter, wanddikte, fabricagewijze, identificatie van de fabrikant, lengtemarkering (zie verder), temperatuurbereik.

Wisselaars dienen voorzien te zijn van een lengtemarkering (per meter), beginnend bij nul meter en naar boven oplopend zodat aan het maaiveld de totale lengte van de wisselaar gecontroleerd kan worden. De geïnstalleerde lengte van elke individuele wisselaar wordt door de aannemer gedocumenteerd.

3.6.2.8 Voet van de sonde

De voet van de sonde kan op twee wijzen worden uitgevoerd.

1. De afzonderlijke heen- en retourleidingen van de PE-bodemwarmtewisselaar zijn fabrieksmatig aan een voetstuk gelast.



Figuur 41: voet van een bodemwarmtewisselaar, bron Rehau

2. De heen- en retourleiding van PE-XA zijn ononderbroken, er zijn geen ondergrondse lassen vereist. Het voetstuk omhult en beschermt de bocht die de U-vormige buis onderaan maakt.



Figuur 42: voet van een ononderbroken bodemwarmtewisselaar voorzien van een ballast. bron: Rehau

De leverancier geeft de stromingsweerstand van het voetstuk op zoals bepaald volgens de NBN EN1267 (*Industriële afsluiters - Beproeving van de stromingsweerstand met water als beproevingsfluidum*)

In elk geval wordt de geometrie van dit voetstuk zodanig uitgevoerd dat ze niet blijft haken tijdens het neerlaten van de warmtewisselaar in het boorgat. Bovendien moet het voetstuk ontworpen zijn om een ballast te kunnen dragen. Deze ballast moet het inbrengen van de bodemwarmtewisselaar in het boorgat bevorderen en het opdrijven in een met water gevuld boorgat vermijden.

Materiaaleisen

Het voetstuk en de verbindingen met de leidingen moeten fabrieksmatig worden aangebracht en moeten worden getest volgens de norm NBN EN 12201-3: Kunststofleidingssystemen voor drinkwatervoorziening, en voor de afvoer en riolering onder druk - Polyethyleen (PE) - Deel 3: Hulpstukken.

Het materiaal moet weerstaan aan hetzelfde temperatuur- en drukbereik als de leidingen.

3.6.2.9 Afstandhouders

Beschrijving

Afstandhouders kunnen worden voorgeschreven om de onderlinge afstand tussen de buizen te vrijwaren en zodoende thermische kortsluiting te voorkomen. Een bijkomend effect dat beoogd wordt is het minimaal houden van de afstand tussen bodemwarmtewisselaar en het boorgat terwijl het vullen van boorgat toch degelijk kan worden gerealiseerd. De afstandhouders worden om de 1.5 à 2 meter geplaatst.

Het effect van de afstandhouders neemt af bij een toenemende thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal en een kleinere diameter van het boorgat.

Materiaal- en vormeisen

De afstandhouders moeten zodanig zijn geconstrueerd dat ze niet reageren met de ondergrond. Ze moeten hun functie kunnen garanderen tijdens het opvullen van het boorgat.

3.6.3 Vulmateriaal



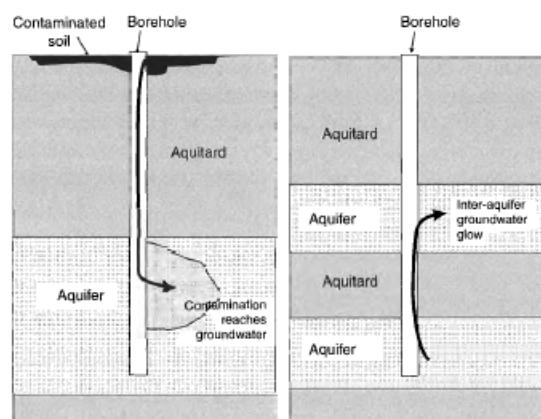
Figuur 43: doorsnede van een boorgat met bodemwarmtewisselaar

Na het boren van het boorgat en de installatie van de verticale bodemwarmtewisselaar, zal het boorgat terug worden opgevuld.

Deze afwerking vermijdt de contaminatie van de watervoerende lagen en is verplicht omwille van de milieuwetgeving, maar is ook bepalend voor de opbrengst van de geothermische installatie.

1. Milieutechnische redenen

- De bescherming van het grondwater tegen oppervlakteverontreinigingen Het vermijden van cross-contaminatie tussen verschillende watervoerende lagen (aquifers) – in zoverre het dieptecriterium dit risico nog niet afdekt.
- Het vermijden van het verlies in natuurlijke druk van een aquifer.
- Herstel of verbetering van het oorspronkelijk hydrogeologische regime
- Het voorzien van een extra barrière tegen mogelijke lekken van het fluïdum (water/glycol)



Figuur 44: functie van de afwerking van een boorgat

De minimale permeabiliteit moet minstens voldoen aan de eisen van de vigerende milieuwetgeving. (Voor het Vlaamse gewest is de maximale permeabiliteit 10^{-8} m/s)

2. Het verbeteren van de energie-uitwisseling tussen de bodemwarmtewisselaar en de omringende bodem.

Om een energie-uitwisseling met de bodem te creëren, is een degelijke thermische geleidbaarheid tussen de bodemwarmtewisselaar en de bodem noodzakelijk. Deze thermische geleidbaarheid wordt enerzijds bepaald door de thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal, maar ook door de eventuele aanwezigheid van holten en/of micro-annuli die ontstaan tijdens of na het aanbrengen van het vulmateriaal.

De ontwerper bepaalt in zijn bestek de minimale aanvaardbare thermische geleidbaarheid en de maximale toelaatbare permeabiliteit van het opvulmateriaal.

De thermische geleidbaarheid van het gebruikte opvulmateriaal bepaalt immers in grote mate de thermische weerstand tussen het fluïdum en de boorwand.

De thermische geleidbaarheid van het opvulmateriaal varieert van 0.7 W/m.K voor opvulmateriaal op basis van bentoniet tot meer dan 2.5 W/m.K voor opvulmateriaal met kwartshoudende zand of silicaatzand.

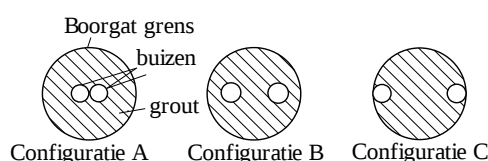
Het is als ontwerper sterk aan te bevelen om vooraf vervaardigd vulmateriaal voor te schrijven waarvan de thermische geleidbaarheid en hydraulische weerstand getest en gedeclareerd zijn door middel van een proefrapport.

Let op. Indien er een blijvende casing (verbuizing van het boorgat) wordt toegepast, levert ook deze een bijkomende thermische weerstand in de totale boorgatweerstand.

3.6.4 Afstand tussen de buizen van de bodemwarmtewisselaar

Tenzij er bijzondere maatregelen worden genomen, kan de tussenafstand tussen de individuele buizen over de volledige lengte van de warmtewisselaar variëren van 0 cm (configuratie A) tot de boordiameter (configuratie C).

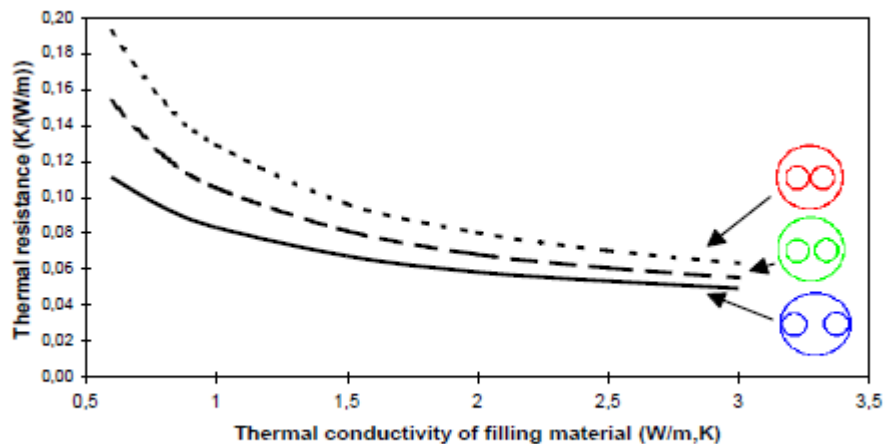
Configuratie A is het meest nadelig. Er ontstaat een thermische kortsluiting tussen de heen- en retourleiding. Bovendien is de thermische weerstand ten gevolge van het opvulmateriaal grout het grootst.



Figuur 45: configuraties van bodemwarmtewisselaars

De meest ideale situatie is configuratie C. De thermische beïnvloeding van de heen- en retourleiding is minimaal, alsook de thermische weerstand ten gevolge van het opvulmateriaal.

De invloed van de thermische geleidbaarheid van het opvulmateriaal op de boorgatweerstand is ook afhankelijk van de afstand van de bodemwarmtewisselaar tot de boorwand.



Figuur 23 : De thermische weerstand ($K/(W/m)$) voor een enkele U-buis in verhouding tot de thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal ($W/m,K$) voor drie verschillende posities van de U-leidingschachten, niet-laminaire stroming ($Re \approx 3000$)

Figuur 46: invloed van de thermische geleidbaarheid en de configuratie van de bodemwarmtewisselaar op de boorgatweerstand

Indien er geen zekerheid kan worden gegeven omtrent de ligging van de buizen, dient de ontwerper te rekenen met een gemiddelde tussenafstand (configuratie B).

Uit de grafiek blijkt ook de dalende invloed van de configuratie op de boorgatweerstand bij een toenemende thermische geleidbaarheid van het opvulmateriaal.

3.6.5 Boorgatdiameter

De diameter van het boorgat wordt zo klein mogelijk gekozen in verhouding tot de buitendiameter van de gebruikte bodemwarmtewisselaar.

Een vergroting van de boordiameter waarbij de afstand van de bodemwarmtewisselaar tot de boorwand verhoogt, blijft, leidt tot een verhoging van de boorgatweerstand. Ze moet wel zodanig zijn dat de lus gemakkelijk kan worden ingebracht en het boorgat voldoende stabiel is. Normaal gesproken zal de diameter van het boorgat tussen de 10 en 20 cm liggen.

3.6.6 Diepte

De diepte van het boorgat kan beperkt worden omwille van

- Vergunningstechnische redenen
- Geologische redenen: bij dieper liggende minder geleidende lagen kan het interessanter zijn om meer ondiepe boorgaten te creëren in beter geleidende lagen.

- Economische redenen;
 - o Boren door een rotsformatie is bijvoorbeeld duurder dan in zand of kleilagen, maar levert een betere thermische geleidbaarheid op en dus een kleinere benodigde totale boorlengte. Men moet hier dus een economisch optimum zoeken tussen de boorkost per lopende meter, de totale boorlengte en de verstelkost van de boormachine per boorgat.

3.6.7 Afstand tussen de boringen

De ontwerper zal de verschillende boringen over de beschikbare ruimte moeten verdelen met het in acht nemen van de minimale onderlinge afstand tussen de bodemwarmtewisselaars maar ook de aanwezigheid van structuren en nutsleidingen. Richtlijnen met betrekking tot minimum afstand tot structuren en nutsleidingen zijn terug te vinden in Tabel 6: richtwaarden voor minimale afstanden tot andere elementen

De onderlinge afstand tussen de bodemwarmtewisselaars is bovendien ook afhankelijk van andere ontwerpparameters zoals het aantal vollasturen van de warmtepomp en het aandeel regeneratie.

Om te voorkomen dat een boring of sondering een al geplaatste wisselaar kan raken wordt bovendien een minimale afstand van 5% van de te bereiken diepte aangehouden. Voor een diepte van 75 m komt dit bijvoorbeeld neer op een minimale afstand van 3.75 m.

De afstanden die in de tabel hieronder worden aangegeven zijn minimale richtwaarden. Reële minimale afstanden zijn afhankelijk van de ondergrond en de gebruikte boortechniek.

Tabel 6: richtwaarden voor minimale afstanden tot andere elementen

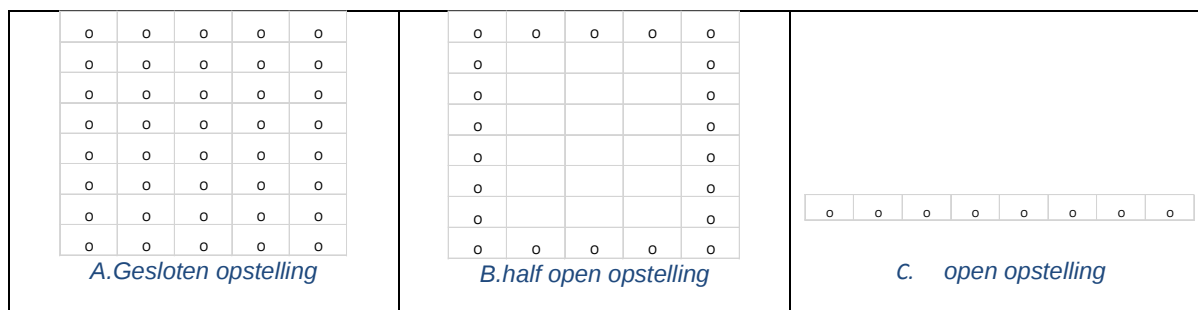
Minimale afstanden (m) tot structuurdelen	
Gevel	0.5
Funderingselementen	1.5
Minimale afstanden (m) tot nutsleidingen	
Ondergrondse niet-watervoerende leidingen	1.5
Drinkwaterput	5
Septische put	5
Aanvoer stadsnet waterleiding	3
Riolering	3
Minimale afstanden (m) tot	
Perceelsgrens	0.5
Bomen	5

3.6.8 Opstellingswijzen

Het ontwerp van het boorveld zal afhangen van de mate dat er gerekend wordt op bodemregeneratie dan wel op energieopslag. Bodemregeneratie zal eerder bevorderd worden door een open of halfopen, opstelling. Bij energieopslag zal eerder geopteerd worden voor een gesloten opstelling.

De volgende figuur geeft de drie principes van configuraties aan.

AB. Gelijkmatisch verdeeld over de omtrek van het terrein



Figuur 47: opstellingswijzen van boorvelden

3.6.8.1 Gesloten opstelling

Bij een gesloten bodemenergiesysteem worden de bodemwarmtewisselaars geplaatst in de meest compacte geometrische vorm met een zo groot mogelijk volume en zo klein mogelijk omhullend oppervlak om het verliesoppervlak naar de omgeving te minimaliseren.

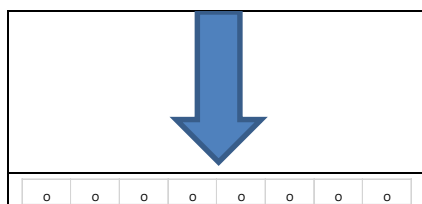
De afstand tussen de wisselaars varieert van 2 tot 5 m afhankelijk van de tijd tussen laden en ontladen van het geheel en de thermische eigenschappen (capaciteit en geleidbaarheid) van de bodem.

Gesloten opstellingen maken grotere piekbelastingen mogelijk.

3.6.8.2 Open en halfopen opstelling

Open opstellingen (alle boorgaten op een rij) en halfopen opstellingen (boorgaten in een U-formatie) verdienen de voorkeur bij systemen met een onbalans waarbij de bodem op een natuurlijke wijze dient te worden geregenereerd. De onderlinge beïnvloeding tussen de boorgaten is beperkter waardoor het onevenwicht zich in hoge mate naar de omliggende omgeving kan verspreiden.

Om de regeneratie optimaal te laten verlopen wordt ingeval van een grondwaterstroming, wordt de open opstelling loodrecht op stromingsrichting van het grondwater georiënteerd zoals aangegeven op onderstaande figuur.



Figuur 48, bodemregeneratie bij een open opstelling met grondwaterstroming

3.7 Fluïdum (thermisch dragermedium, warmtetransportmiddel)

Het fluïdum stroomt door de verticale bodemwarmtewisselaars, het horizontaal netwerk en de collectoren en staat in voor de energie-uitwisseling tussen de bodem en de warmtepomp.

De hoeveelheid energie dat het circulerend fluïdum kan uitwisselen met de bodem is afhankelijk van de samenstelling, het stromingsregime en het toegelaten temperatuurbereik.

Ontwerpmediumtemperatuur

De ontwerpmediumtemperatuur wordt gedefinieerd als het gemiddelde van de aanvoer- en retourtemperatuur van het fluïdum. Hoe hoger het verschil tussen de ontwerpmediumtemperatuur en de temperatuur van het boorgat, hoe groter het mogelijk te onttrekken vermogen.

De toegestane temperaturen tijdens de pieklast beïnvloeden de uiteindelijk totale lengte van de bodemwarmtewisselaars. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat bijvoorbeeld een verlaging van de minimumtemperatuur bij verwarming de prestatiecoëfficiënt van de warmtepomp zal afnemen.

Anderzijds zal een verhoging van de maximum mediumtemperatuur het rendement bij koeling doen dalen.

Er zijn bovendien nog redenen om de aanvoer- en retourtemperaturen te beperken:

Minimum temperatuur

Tijdens de verwarmingsmodus mag om verschillende redenen de temperatuur van het fluïdum niet te laag worden.

- Geotechnisch: alhoewel bevroren grond een hogere thermische geleidbaarheid heeft, is het zeker in de buurt van gebouwen niet aangewezen om de grond sterk te bevriezen. Bovendien worden de mechanische eigenschappen van kleigrond beschadigd door wisselende vorst/dooicycli.
- Fluïdum: de gemiddelde temperatuur mag niet onder het vriespunt van de circulerende vloeistof in de bodemwarmtewisselaars zakken. Dit zou de bodemwarmtewisselaar ter hoogte van de verdamper kunnen beschadigen.

De uittredetemperatuur uit de warmtepomp (= aanvoertemperatuur in de bodemwarmtewisselaar) wordt daarom beperkt tot -3°C voor systemen met een antivriesmengsel. Tot 4°C voor systemen met water als fluïdum.

Maximum temperatuur

Om de bodemwaterkwaliteit te vrijwaren wordt de maximum ontwerpmediumtemperatuur beperkt tot 25°C

Samenstelling

Het fluïdum bestaat uit een mengeling van water en antivriesmiddel.

Door de toevoeging van het antivriesmiddel kan men, weliswaar tijdelijk, negatieve bodemtemperaturen bereiken.

In de vergunning worden voorwaarden opgelegd met betrekking tot de samenstelling van het antivriesmiddel. De samenstelling van het antivriesmiddel en de mengverhouding met het water worden ter inzage gehouden van de toezichthouders.

De eigenschappen van het fluïdum zijn afhankelijk van de temperatuur.

Eigenschappen Monopropyleenglycol		Temperatuur (°C)						
		-5	0	5	10	15	20	25
25%	Dichtheid (kg/m³)	1032.7	1031.2	1029.6	1027.8	1025.9	1023.9	1021.8
	Warmtecapaciteit (J/kgK)	3867	3879	3891	3903	3915	3928	3940
	Warmtegeleiding (W/mK)	0.441	0.448	0.455	0.461	0.467	0.473	0.479
	Viscositeit (mPa.s)	6.01	4.87	4.00	3.31	2.78	2.30	2.02
	Vriespunt (°C)	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00	-9.00

Eigenschappen Monopropyleenglycol		Temperatuur (°C)						
		-5	0	5	10	15	20	25
30%	Dichtheid (kg/m³)	1037.7	1036.0	1034.3	1032.4	1030.4	1028.3	1026.0
	Warmtecapaciteit (J/kgK)	3810	3813	3827	3840	3854	3867	3880
	Warmtegeleiding (W/mK)	0.422	0.428	0.434	0.440	0.446	0.451	0.456
	Viscositeit (mPa.s)	8.14	6.43	5.16	4.19	3.45	2.88	2.43
	Vriespunt (°C)	-12.1	-12.1	-12.1	-12.1	-12.1	-12.1	-12.1

Eigenschappen Monopropyleenglycol		Temperatuur (°C)						
		-5	0	5	10	15	20	25
35%	Dichtheid (kg/m³)	1042.3	1044.6	1038.7	1036.7	1034.6	1032.3	1030.0
	Warmtecapaciteit (J/kgK)	3728	3742	3757	3772	3787	3801	3816
	Warmtegeleiding (W/mK)	0.4304	0.410	0.415	0.420	0.423	0.430	0.434
	Viscositeit (mPa.s)	11.67	8.82	6.82	5.38	4.32	3.53	2.93
	Vriespunt (°C)	-15.5	-15.5	-15.5	-15.5	-15.5	-15.5	-15.5

Tabel 7: medie-eigenschappen van monopropyleenglycol bij concentraties en temperaturen

Aanbevolen wordt een fluïdum bestaande uit minimaal een volumepercentage van 25 % en een maximaal volumepercentage van 35 % monopropyleenglycol.

Het is aan te bevelen om een mengsamenstelling te nemen zodat het vriespunt minstens 5°C lager te nemen dan de laagst voorkomende mediumtemperatuur. Rekening houdend met de hoger vermelde minimum uittredetemperatuur van -3°C, wordt een minimum vriespunt van het mengsel van -8°C vereist.

Men moet rekening houden met een verhoging van de viscositeit bij een stijgende concentratie van antivries. Dit heeft een stijgende drukval over het hydraulisch circuit tot gevolg en leidt tot een hoger pompverbruik. (zie ook § 3.8)

Indien er gekozen wordt voor een mengsel met een volumepercentage lager dan 25% antivries, dan dient dit mengsel te worden behandeld met biocide om bacteriegroei te voorkomen.

Als zuiver water wordt gebruikt als fluïdum en als er enig risico is van bevriezing ter hoogte van de verbindingen of voedingen wanneer het systeem voor lange tijd wordt stilgelegd, dan moet er een vrieswaarschuwingssysteem worden voorzien. Kort spoelen van het systeem met warm water vermijdt vorstschade

Stromingsregime

Het warmtetransport tussen een vaste wand en een daarlangs stromend fluïdum wordt beschreven met de warmteoverdrachtscoëfficiënt of de convectiecoëfficiënt (W/m^2K)

Voor turbulente stromingen is deze factor groter dan $1000 W/m^2K$. Terwijl voor laminaire stromingen deze factor lager is dan $100 W/m^2K$.

Voor een optimale warmte-overdracht tussen het fluïdum en de buiswand, wordt er gestreefd naar een licht-turbulente stroming.

Voor meer achtergrond en de concrete evaluatie wordt er verwezen naar § 3.8.5

3.8 Hydraulisch netwerk

3.8.1 Algemeen

De verticale bodemwarmtewisselaars uit het bodemenergiesysteem zijn verbonden met de verdamperzijde van de warmtepomp of met andere elementen van het gehele geothermisch systeem (vb warmtewisselaar passieve koeling, regeneratiesysteem via thermische zonnecollectoren). Dit wordt gerealiseerd door een hydraulisch netwerk, dat bijzondere aandacht verdient, onder andere:

- De configuratie waarop de verschillende bodemwarmtewisselaars met elkaar verbonden worden, hieronder meer in detail uitgewerkt, met bijzondere aandacht voor een voldoende evenwichtige doorstroming
- De opbouw van het hydraulisch circuit, met vereiste afsluiters, driewegkranen of regelkranen, pompen, expansievaten, warmtewisselaars, ontluchting, vul- en afluatsystemen, beveiligingen zoals overdrukventielen of temperatuurveiligheden, meettoestellen zoals druk-, temperatuur-, debiet- of energiemeters, ...
- De dimensionering van het hydraulisch circuit wat betreft leidingdiameters met betrekking tot drukverliezen en stroomsnelheden en alle andere bovengenoemde componenten, waarbij rekening moet worden gehouden met het gebruik van een dragermedium met andere eigenschappen dan normaal gebruikelijke water (anti-vriesproducten). Hierbij moet een evenwicht worden nagestreefd tussen het beperken

van drukverliezen en pompverbruik enerzijds (vereist grote diameters) en het beperken van de kosten en het realiseren van voldoende turbulente stroming in de warmtewisselaars (vereist kleine diameters)

Met betrekking tot de algemene aspecten van het hydraulisch aspect verwijzen wij de lezer naar het WTCB Rapport nr 14, Ontwerp en dimensionering van centrale-verwarmingsinstallaties met warm water (2013). Waar relevant wordt in deze tekst naar dat document verwezen, met vermelding van specifieke aspecten (bijvoorbeeld het gebruik van toevoegingsproducten en het effect op drukverliezen, pomp en expansievat).

3.8.2 Prestatieeisen

Het volledig hydraulisch netwerk moet aan de volgende eisen voldoen:

- Voor een optimale warmte-overdracht tussen het fluidum en de buiswand, wordt er gestreefd naar een licht-turbulente stroming. Het stromingsgedrag (laminair of turbulent) wordt weergegeven door het Reynoldsgetal (Re).
 - o Deze twee stromingswijzen kunnen gedifferentieerd worden op basis van het Reynoldsgetal (Re), dat berekend wordt aan de hand van de volgende formule:
 - $Re = v D / \nu$
 - waarbij:
 - v : de gemiddelde snelheid van de stroming [m/s]
 - D : de inwendige diameter van het kanaal [m]
 - ν (nu): de kinematische viscositeit [m²/s]
 - o Een laminaire stroming treedt op bij $Re < 2200$. Turbulente stroming treedt op als $Re > 3200$. In het interval tussen 2300 en 3200 is er “transitionele” stroming, waarbij zowel laminaire als turbulente stroming mogelijk is, afhankelijk van andere factoren zoals bijvoorbeeld de ruwheid van de leiding. Het Reynoldsgetal voor een licht-turbulente stroming ligt tussen de 2300 en 2500
- Alle bodemwarmtewisselaars moeten met vooropgestelde debiet op stabiele wijze doorstroomd worden. Het ontwerpdebiet wordt bepaald bij het ontwerp van de verticale bodemwarmtewisselaar (zie ook tool ...). Het werkelijke debiet mag per bodemwarmtewisselaar niet meer afwijken dan 10 % van het ontwerpdebiet en voor het gehele boorveld niet meer dan 5 %. Principieel zijn er 2 methodieken voor het bereiken van voldoende debietevenwicht, met mogelijke combinatie van beide:
 - Men voert een voldoende nauwkeurig hydraulisch ontwerp door en zorgt voor een plaatsing volledig conform dit ontwerp zodat afstelling in praktijk kan worden vermeden
 - Er worden voorzieningen ingebouwd om de debieten af te stellen en te meten

Concreet betekent dit criterium dat elke bodemwarmtewisselaar hydraulisch zo goed mogelijk identiek is: zelfde diameter, zelfde materiaal, zelfde lengte en uitvoering, zelfde hydraulische configuratie (serie/parallel-verzamelcircuit)

- Het pompverbruik bij het ontwerpdebiet is kleiner dan 2.5 % van het condensorvermogen van de warmtepomp. Daartoe worden de drukverliezen in het hydraulische circuit beperkt door:
 - o De verschillende bodemwarmtewisselaars zoveel mogelijk parallel te koppelen (vermijden van seriële koppeling)
 - o het minimaliseren van de lineaire verliezen doorheen de bodemwarmtewisselaars en het horizontaal netwerk
 - o het beperken van de plaatselijke verliezen zoals bochten, koppelstukken, ventielen,...
- In bepaalde toepassingen is het gewenst het totale debiet te kunnen laten variëren, in functie van het gevraagde vermogen door de warmtepomp.
- In de praktijk stellen zich een aantal bijkomende criteria:
 - o De verschillende bedieningsorganen zijn goed bereikbaar
 - o Het gehele netwerk moet kunnen worden gespoeld, gevuld en ontlucht, leeggemaakt
 - o Het aantal (onbereikbare) koppelingen wordt beperkt, met het oog op het opsporen en herstellen van eventuele lekken. Bij accidentele lekken moeten bepaalde BWW's of groepen kunnen worden afgekoppeld
 - o De warmtepomp bevat minstens een beveiliging die de installatie uitschakelt bij een onderschrijding van het minimale doorstroomdebiet
 - o het hydraulisch netwerk bevat verder een aantal componenten die nodig zijn voor het normale gebruik, de indienstelling, de controle of meting en de veiligheid van de installatie, zoals verder beschreven in de paragraaf hydraulisch schema

In praktijk tracht men een zo goed mogelijk evenwicht te realiseren tussen de verschillende criteria. Men zal er zich bijvoorbeeld rekenschap van geven dat een verhoogde turbulentie een groter energieverbruik van de pomp tot gevolg heeft. De ontwerper zoekt naar een optimum tussen dit verhoogd energieverbruik en de verbeterde energieoverdracht tussen het fluïdum en de boorwand door een afweging tussen investerings- en exploitatiekosten. Op die wijze kan het ontwerp een iteratief proces zijn, waarbij de ontwerper een optimaal evenwicht nastreeft tussen de verschillende criteria, in functie van de eigenheden van het project.



Het materiaal van de horizontale leidingen is minimaal PE100, PN8, stijfheidsklasse SN8 of gelijkwaardig en is gemerkt met de typeaanduiding, de fabricagedatum, de drukklasse en de wanddikte en voldoet aan de NBN EN 12201-reeks; Kunststofleidingssystemen voor drinkwatervoorziening, en voor de afvoer en riolering onder druk - Polyethyleen (PE).

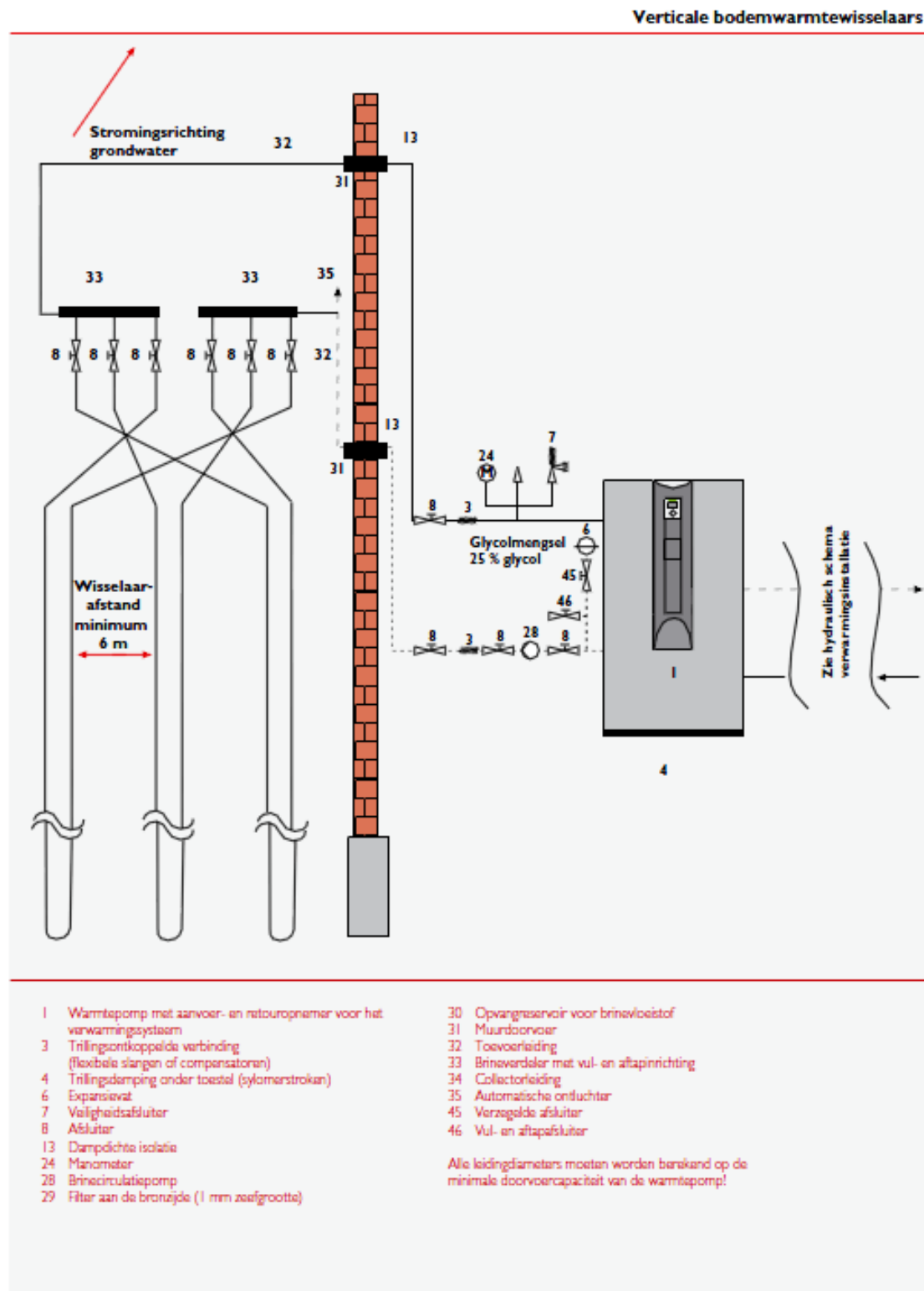
De leidingen kunnen ook vervaardigd zijn in PE X. Norm: NBN EN ISO 15875-2

Voor het materiaal van de VBWW zelf, zie § ...

3.8.3 Globaal hydraulisch circuit

Een globaal hydraulisch circuit wordt voorgesteld in figuur ...en bevat volgende elementen met de beschreven functionaliteiten:

Hydraulische inpassing



- Een set van verticale bodemwarmtewisselaars
- Minimaal 2 collectoren voor het verzamelen van de bodemwarmtewisselaars tot 1 circuit, waarbij:
 - o Er verschillende configuraties mogelijk zijn, besproken in § ...
 - o Elke BWW of groep aangesloten BWW's afzonderlijk moet kunnen worden afgesloten met bereikbare ventielen om:
 - Deze BWW of groep individueel te kunnen spoelen, ontluichten en vullen bij de opstart
 - Elke BWW of groep individueel buiten werking kan worden gesteld, bijvoorbeeld in geval van een lek
 - o Indien men kiest voor de methode van afstelling van de debieten moet elke BWW worden voorzien van een regelkraan en een debietmeetmogelijkheid (meetnippels, debietmeter, thermometers?)
- Elke collector is voorzien van een hoofdafsluiter en een vul of aftapkraan
- Het gemeenschappelijke circuit bevat verder:
 - o Een set van 2 afsluiters ter hoogte van de aansluiting aan de condensor
 - o Een demonteerbare pomp, voorzien van 2 service-afsluiters
 - o Een expansievat (eventueel met verzegelbare afsluiter) en een manometer
 - o Een vul- en aftapvoorziening voor het water/antivriesmengsel en om regelmatige controles te doen op de samenstelling ervan.
 - o Een set van 2 trillingsontkoppelde verbindingen?
 - o Een set van 2 afsluiters op het circuit voor directe aansluiting op de buitenleiding
 - o Een overdrukventiel (meestal 3 bar) met opvangbak,
 - o Een thermometer op aanvoer en retourleiding
 - o Een ontluichter op elk hoogste punt van de installatie
 - o Filter 1 mm?
 - o

Merk op dat sommige warmtepompen intern al kunnen voorzien zijn van een aantal van hogervermelde voorzieningen. Er moet dan worden nagegaan in welke mate deze geschikt zijn voor hun opdracht, vb capaciteit van de pomp of expansievat,...

Naast het algemene schema kunnen er ook specifieke schema's zijn, in functie van bijzonderheden aan het project:

- Aanvullende meet- en regelorganen
- Externe warmtewisselaar ter hoogte van de warmtepomp
- warmtewisselaar passieve koeling
- regeneratiesysteem via thermische zonnecollectoren
- ...

3.8.4 Boorveldconfiguraties

Opm: voor de verdeling van de BWW over het terrein verwijzen we naar § 3.6.8: Opstellingswijzen

Deze paragraaf beschrijft de verschillende configuraties voor de aansluiting van de BWW aan de collectoren, met bijzondere aandacht voor de hydraulische afstelling.

Een boorveld kan worden opgedeeld in een aantal groepen met telkens een aantal BWW's. We stellen daarbij:

- n = aantal BWW (een dubbele telt voor 2)
- g = aantal groepen
- p = aantal BWW per groep

Als vuistregel wordt het aantal bodemwarmtewisselaars per groep gelijk genomen aan het aantal groepen. Voorbeeld: voor een boorveld van 16 bodemwarmtewisselaars kiest men voor 4 groepen van 4 wisselaars in plaats van 2 groepen van 8 bodemwarmtewisselaars. (anders gezegd: aantal groepen = vierkanstwortel aantal BWW's)

Dus: $n = g * p$

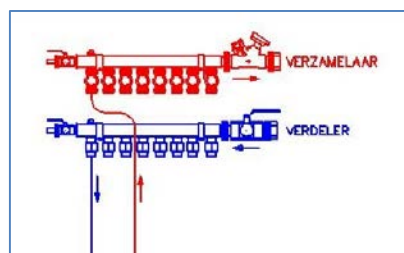
En g = afronden ($\sqrt[n]{n}$)

Voor para T ... is het gebruikelijk om met een aantal groepen te werken ...

Merk op dat er met een parallelle centrale aansluiting (zie verder) niet met groepen wordt gewerkt.

3.8.4.1 De collector

De collector is de eenheid bestaande uit een verdeler en verzamelaar van waaruit de afzonderlijke bodemwarmtewisselaars of de circuits van bodemwarmtewisselaars (vb Tichelmanncircuits) vertrekken.

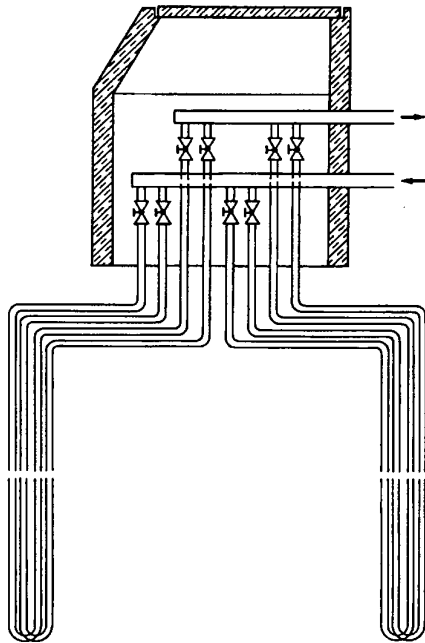


Figuur 50: collector

Tenzij het boorveld zich onder het gebouw bevindt, wordt bij een groot boorveld (>10 boringen) de collector buiten het gebouw geïnstalleerd, bijvoorbeeld in een betonnen collectorput met afsluitmogelijkheid. Bij kleinere boorvelden wordt de collector veeleer in het gebouw geplaatst.

De collectoren met regel- en afsluitkranen moeten altijd op een veilige manier bereikbaar zijn. De nodige maatregelen moeten worden genomen opdat de collector en de kranen niet onder water kunnen staan. zie

3.8.4.2 *Parallele centrale aansluiting*



Figuur 51: centrale aansluiting, bron Verheyden of beter even hertekenen?

opm: het betreft eenvb met dubbele

Principe en toepassingsgebied

Elke bodemwarmtewisselaar wordt afzonderlijk naar een centrale collector geleid.

De configuratie wordt aanbevolen voor kleine systemen (tot maximum 3 à 4 bodemwarmtewisselaars)

Voordelen:

- Elke bodemwarmtewisselaar kan afzonderlijk worden afgesloten ingeval van storing of lekkage.

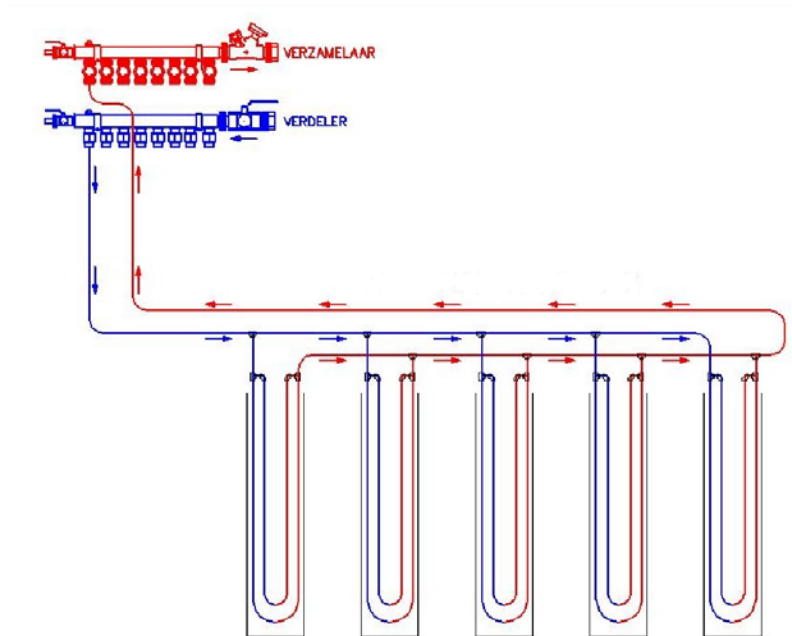
Nadelen:

- De volumestroom van het dragermedium moet per bodemwarmtewisselaar worden afgesteld indien de dimensionering en uitvoering geen voldoende evenwichtige doorstroming garandeert.
- Doordat het totale debiet verdeeld wordt over de verschillende bodemWW's, is het moeilijker om een licht-turbulente stroming te bereiken.

Aandachtspunt

- Onderhoud van de collectorput zodat de individuele afstelkranen ook na jaren nog kunnen worden gebruikt.

3.8.4.3 Parallele Tichelmannaansluiting



Figuur 52: Tichelmann aansluiting, bron handboek energiepalen

Principe en toepassingsgebied

De Tichelmannaansluiting is een methode waarbij de lengte van de aansluitingen naar elke individuele BWW steeds gelijk is. Deze aansluitingswijze heeft het voordeel dat de totale hydraulische weerstand over elke bodemwarmtewisselaar hetzelfde is.

De individuele bodemwarmtewisselaars worden via T-koppelingen aangesloten op de hoofdleidingen zoals aangegeven op figuur 50.

Voordelen:

- De thermische belasting van elke bodemwarmtewisselaar is gelijkwaardig. Bij een goede uitvoering is er geen afzonderlijke inregeling per bodemwarmtewisselaar nodig.
- De leidingen tussen de collector en het boorveld blijven beperkt tot één aanvoer- en één retourleiding per groep van BWW's.
- Bij een groot aantal bodemwarmtewisselaars kan het aantal aansluitingen op de collector worden beperkt

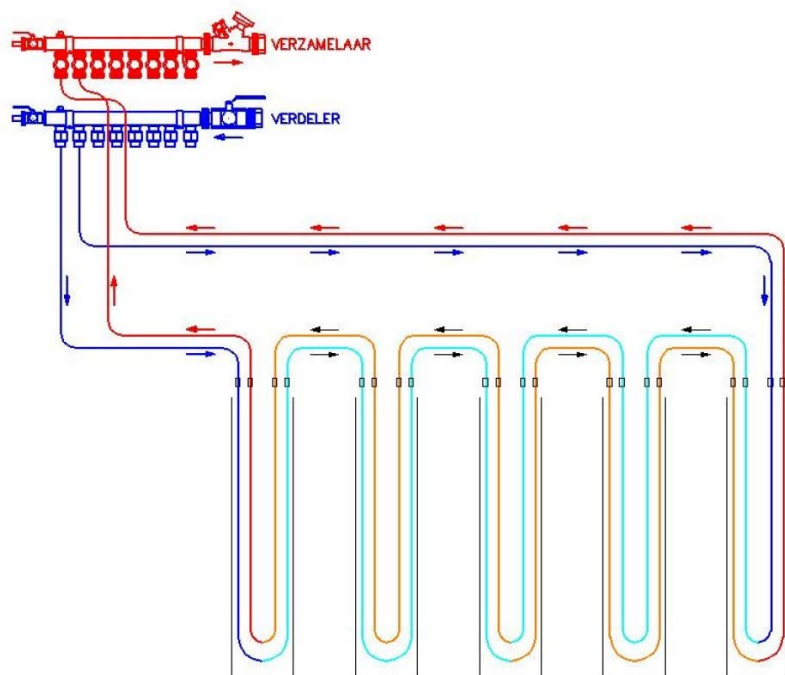
Nadelen:

- Lekkages of storingen kunnen niet op niveau van een bodemwarmtewisselaar worden opgespoord en uitgeschakeld.
- Doordat het totale debiet verdeeld wordt over de verschillende bodemWW's, is het moeilijker om een licht-turbulente stroming te bereiken.

Aandachtspunten

- Bijzondere aandacht moet besteed worden aan het ontluchten van het systeem. Daarom wordt het aantal bodemwarmtewisselaars beperkt tot 6 per groep.
- Er kan eventueel worden overgegaan tot maximaal 6 circuits van dubbele bodemwarmtewisselaars. Houd er evenwel rekening mee dat hoe meer BWW's in een circuit worden opgenomen, hoe moeilijker de ontluchting van dat circuit wordt.

3.8.4.4 Serieaansluiting



Figuur 53: seriekoppeling (bij dubbele BWW's)

Principe en toepassingsgebied:

De bodemwarmtewisselaars worden achtereenvolgend aangesloten zoals aangeduid op de figuur.

Om een gelijke thermische belasting te bekomen van alle bodemlussen dient het principe toegepast te worden met dubbelvoudige bodemwarmtewisselaars. In elk boorgat komt zo een koudere en een warmere lus terecht waardoor de gemiddelde vloeistoftemperatuur in alle boorgaten nagenoeg gelijk blijft. De centraal gelegen bodemlussen bevatten 2 lussen met een gemiddelde temperatuur.

Voordeel

- Nuttig bij een ongewoon groot aantal boorgaten, bijvoorbeeld door een beperkte lengte ervan (door geologische beperkingen, energiepalen, ...) of door een lage warmtegeleidbaarheid van de bodem. In dergelijke situaties is het debiet vereist door de warmtepomp gedeeld door het groot aantal boorgaten te laag om een licht-turbulente stroming en dus een efficiënte warmte-uitwisseling te verzekeren. Dit probleem kan verholpen worden door bijvoorbeeld in elk parallel circuit twee of meerdere boorgaten in serie te schakelen.

Nadeel

- Indien er zich een lek voordoet in een van de bodemwarmtewisselaars moet de helft van een volledige groep buiten gebruik worden gesteld. De capaciteit van de volledige groep vermindert dan met 15 tot 20%. Dit is het verschil tussen de opbrengst van enkel- en dubbele bodemwarmtewisselaars.
- Men creëert 'hoge punten' in het systeem, waar lucht kan samenhopen en de doorstroming kan verhinderen. In dergelijke gevallen zal ontlucht worden met een voldoende krachtige spoelpomp.
- Bij diepe boorgaten kunnen de lengte van het hydraulisch circuit en de hydraulische weerstand hoog oplopen, en dreigt men niet te kunnen voldoen aan het criterium van maximaal pompverbruik.

3.8.5 Hydraulische dimensionering

Voorafgaande opmerking: hoofdstuk 3 bespreekt het ontwerp van de bodemenergiesysteem, waaruit het aantal BBW, de lengte van elke BWW, het gebruik van enkele of dubbele BWW's, de diameter van de gebruikte buizen volgt. De hydraulische dimensionering hieronder bouwt daarop voort.

De dimensionering van het hydraulisch circuit betreft de selectie van leidingdiameters met betrekking tot drukverliezen en stroomsnelheden en alle andere bovengenoemde componenten, waarbij rekening moet worden gehouden met het gebruik van een dragermedium met andere eigenschappen dan normaal gebruikelijke water (anti-vriesproducten).

Een slecht gedimensioneerd netwerk kan leiden tot een zeer hoge drukval, slechte thermische prestatie door een te lage energie-overdracht met de bodem en zeer hoge pompverbruiken.

Het dimensioneren van het hydraulisch circuit en de circulatiepomp is vaak een iteratief proces waarbij de ontwerper streeft naar een optimaal thermisch rendement met een zo laag mogelijk elektrisch pompverbruik.

Deze gegevens vormen de input voor de volgende processtappen:

1. Bepaling van het totale verdamperdebiet.

In praktijk wordt er voor een gegeven verdampervermogen ofwel direct een debiet vastgelegd (door de fabrikant van de warmtepomp) ofwel een temperatuurverschil ($\Delta\theta$) vastgelegd

(standaard 3 K of volgens de boorvelddimensionering), waaruit het debiet kan worden berekend op basis van volgende formule:

7.3.2.2 WATERDEBIET DOOR EEN VERWARMINGSLICHAAM

Het waterdebiet dat door een in een tweepijpsinstallatie geplaatst verwarmingslichaam stroomt (zie afbeelding 25, p. 90), kan berekend worden volgens de volgende formule:

$$q_{m,rad} = \frac{\Phi \cdot 3600}{c \cdot (\theta_{w,i} - \theta_{w,r})} \quad (\text{kg/h}) \quad (7.1)$$

waarbij:

$q_{m,rad}$: het waterdebiet door de radiator (in kg/h)

Φ : het werkelijk afgegeven vermogen van de radiator (in W)

3600: een conversiefactor (in s/h)

c : de specifieke warmtecapaciteit van water, volgens tabel A.1 (p. 226) uit bijlage A (in J/kg.K)

$\theta_{w,i}$: de ontwerpvertrekwatertemperatuur (aan de ingang van de radiator) (in °C)

$\theta_{w,r}$: de ontwerpretourwatertemperatuur (aan de uitgang van de radiator) (in °C).

VOORBEELD

Indien het verschil tussen de vertrek- en de retourwatertemperatuur 20 K bedraagt en de gemiddelde watertemperatuur gelijk is aan 70 °C, zal het volgens formule (7.1) berekende waterdebiet in een radiator met een genormaliseerde warmteafgifte van $\Phi_n = 2500 \text{ W}$ ($= \Phi$) gelijk zijn aan:

$$q_{m,rad} = \frac{2500 \cdot 3600}{4190 \cdot 20} = 107,4 \text{ kg/h.}$$

In dit voorbeeld is de specifieke warmtecapaciteit van water c gelijk aan 4190 J/kg.K voor een watertemperatuur $\theta_{w,m}$ van 70 °C (zie tabel A.1, p. 226).

(zie Rapport 14, formule 7.1)

Voorbeeld:

2. Bepaling van het nodige debiet voor licht turbulente stroming

Het vereiste minimale debiet doorheen de BWW voor licht turbulente stroming kan bepaald worden op basis van volgende formule:

5.1.1 Luchtstromingswijzen

Wat de beweging van de lucht in een kanaal betreft, onderscheiden we twee grote stromingswijzen: de laminaire en turbulente stroming.

Bij een **laminaire stroming** volgen de moleculen een baan die evenwijdig loopt met de stromingslijnen (zie afbeelding 5). De snelheid van de moleculen neemt af vanuit het centrum van de stroming naar aan de rand toe (nabij de wanden), waar de snelheid nul is (zie afbeelding 6).

Bij een **turbulente stroming** verplaatsen de moleculen zich in alle richtingen ten opzichte van de basisstroming van de luchtverplaatsing in ongeordende bewegingen (zie afbeelding 5). Vanwege de energieoverdrachten die zich voordoen binnenin de stroming, wordt het snelheidsprofiel sterk afgeplat en bevindt het zich vrijwel loodrecht op de as van de stroming (zie afbeelding 6). De turbulenties zijn het grootst nabij de wanden. De laag die zich op deze plaats bevindt, noemen we de 'grenslaag'.

Deze twee stromingswijzen kunnen gedifferentieerd worden op basis van het Reynoldsgetal (Re), dat berekend wordt aan de hand van de volgende formule:

$$Re = \frac{v D}{\nu} \quad [-] \quad (19)$$

waarbij:

- v : de gemiddelde snelheid van de stroming [m/s]
- D : de inwendige diameter van het kanaal [m]
- ν (nu): de kinematische viscositeit [m²/s] (zie tabel 3).

De gemiddelde snelheid is gelijk aan het resultaat van de deling van het debiet door de oppervlakte van de rechte doorsnede van het kanaal:

$$v = \frac{4 q_v}{\pi D^2} \quad [\text{m/s}] \quad (20)$$

waarbij q_v het luchtdebiet [m³/s] is.

Vermits $q_{vBWW \min} = Re \nu / D \pi D^2 / 4$ (Rapport 14 – formule..)

Is $q_{vBWW \min} = 2500 \nu \pi D / 4$

Met

- $Re = 2500$
- een viscositeit in overeenstemming met het fluïdum en de temperatuur (zie tabel ...)
- een standaard gebruikte leiding 32 x 3 (binnendiameter 26 mm) of
 - o 25 x 2.3
 - o 40 x 3.7
 - o Zie ook tabel 4

Voorbeeld:

3. Bepaling van de configuratie voor licht turbulente stroming

De configuratie moet nu zodanig bepaald worden dat per BWW dit minimale debiet minstens wordt overschreden. Als we het verdamperdebiet delen door het minimale BWW debiet weten we hoeveel seriegroepen we maximaal mogen hebben.

$$q_{m, \text{verd}} / q_{m, \text{BWW}} = \max$$

Als 'max' groter is dan of gelijk is aan n (het aantal BWW) dan kunnen we het veld zonder problemen opdelen met een zuivere parallelschakeling (parallel centraal of parallel Tichelman). Is 'max' kleiner dan n, dan moeten we opdelen in groepen: het minimum aantal groepen is: $n/\max$.

In functie van de gewenste configuratie en de noodzaak om een minimaal debiet te realiseren, kan het vereist zijn om het aantal VBWW aan te passen, waarna een nieuwe dimensionering of controle van het boorveld wordt doorgevoerd (vb het aanpassen van de diepte van de boring, voor zover mogelijk)

Voorbeeld:

- $Q_{m, \text{verd}} = 3200 \text{ kg/h}$
- $n = 12$
- 4 groepen van 3 BWW in serie
Debiet per groep $q_{m, g} = 3200/4 = 800 \text{ kg/h}$
Debiet per BWW $q_{m, p} = \text{debiet per groep} = 800 \text{ kg/h}$

4. Globale controle van het pompverbruik

Er wordt geadviseerd om het elektrische vermogen van de circulatiepomp voor de VBWW lager te houden dan 2.5% van de thermische output van de warmtepomp bij B0/W35 (Energy, 2012). Voordat de drukverliezen in detail worden berekend is het nuttig een globale controle door te voeren of hieraan zal kunnen worden voldaan.

Het totale maximale drukverlies wordt gegeven met behulp van formule:

$$\Delta p_{\max} = 0.025 \rho \cdot c \cdot \Delta \theta \cdot \eta$$

Met:

$\Delta p_{\max}$ = het maximale drukverlies (in Pa)

ρ = de volumemassa van het fluïdum (in kg/m^3)

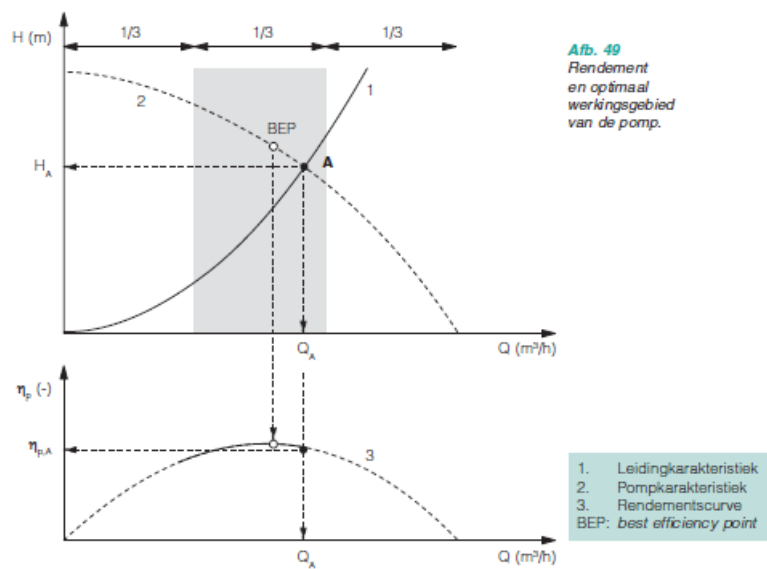
C = de specifieke warmtecapaciteit van het fluïdum (in J/kg.K)

$\Delta \theta$ = het temperatuurverschil over de verdamper (in K)

η (eta) = het globaal rendement van pomp en motor ()

Voor het rendement kan men bij gebrek aan specifieke gegevens (de pomp is immers meestal nog niet gekend) volgende waarden aanhouden, voor zover het een 'state of the art' pomp betreft en het werkingpunt gekozen zal worden in het middelste derde van de pompkarakteristiek.

(Vereenvoudigde grafiek maken van, of verwijzen naar R14, figuur 49)



Rendementen bij standaard-natloperpompen (richtwaarden)

Pompen met

motorvermogen P_2

η_{tot}

tot 100 W	ca. 5 % – ca. 25 %
100 tot 500 W	ca. 20 % – ca. 40 %
500 tot 2500 W	ca. 30 % – ca. 50 %

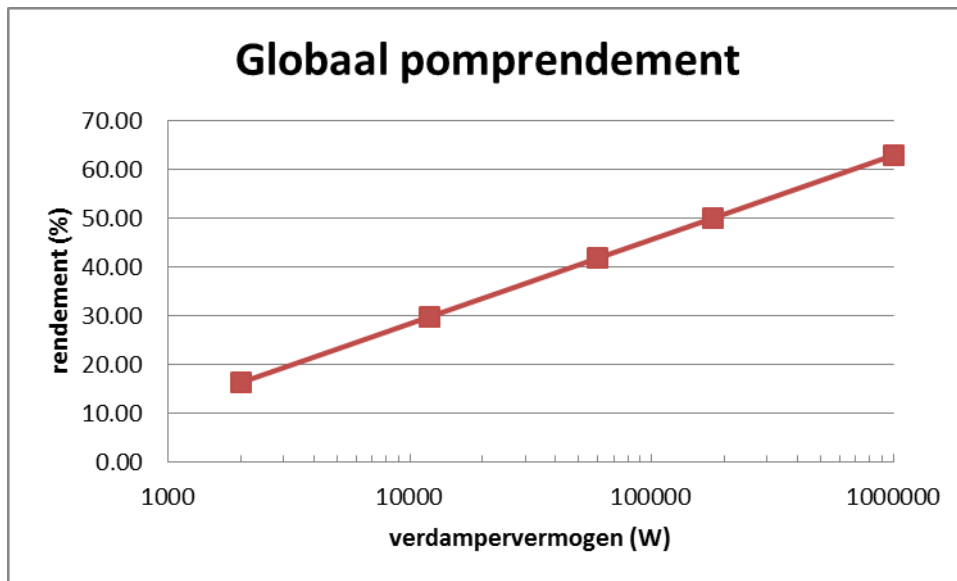
Rendementen bij droogloperpompen (richtwaarden)

Pompen met

motorvermogen P_2

η_{tot}

tot 1.5 kW	ca. 30 % – ca. 65 %
1.5 tot 7.5 kW	ca. 35 % – ca. 75 %
7.5 tot 45.0 kW	ca. 40 % – ca. 80 %



Om het maximale drukverlies in de VBWW zelf te kunnen bepalen zal het totale maximale drukverlies verminderd worden met:

- Het drukverlies over de verdamper bij het verdamperdebiet ($q_{m,verd}$, op basis van de gegevens van de fabrikant met behulp van een curve; indien het drukverlies voor het verdamperdebiet niet direct gekend is, kan het bepaald worden op basis van een andere waarde met volgende de formule:

$$\Delta p_{\text{verdamer}} = (q_{m\text{tot}}/q_{m\text{opg}})^2 \Delta p_{\text{opg}}$$

Met:

- $q_{m\text{verdamer}}$: debiet door de verdamper (in kg/h)
- Δp_{opv} : opgegeven drukverlies (in Pa)
- $q_{Q\text{mopg}}$: debiet waarvoor het drukverlies Δp_{opg} wordt gegeven (in kg/h)
- Het drukverlies in de gemeenschappelijke delen van het hydraulisch circuit, met inbegrip van de afsluiter- en regelkranen, over de collector tot aan de aansluiting van de VBWW ter hoogte van het boorgat. Dit kan worden ingeschat op 20 %, tenzij de afstand tussen verdamper en de boorgaten erg groot is.

In functie van de gekozen configuratie (zie punt 3) wordt de totale lengte van de seriegeschakelde BWW's bepaald: dit kan een enkele lus (boordiepte x 2) een seriegeschakelde dubbele lus (boordiepte x 4) of meer voor seriegeschakelde lussen betreffen.

Het toegestane drukverlies per meter in de VBWW bedraagt dan:

$$\Delta p_{\text{max VBWW}} = (\Delta p_{\text{max}} - \Delta p_{\text{verdamer}}) / 1.2 / \text{totale lengte}.$$

Een berekening van het lineïeke drukverlies, of een controle in de tabel (rekening houdend met het debiet door één enkele BWW, het fluïdum en de temperatuur) laat toe te verifiëren of

hieraan voldaan is. Eventueel moeten een aantal hogervermelde stappen worden herhaald waarbij men op volgende wijze kan ingrijpen:

- Verkleinen van de boorgatdiepte (en verhogen van het aantal boringen)
- Kiezen voor een grotere maat van buis
- Kiezen voor een andere configuratie: vergroten diepte, maar minder boringen, en geen seriekoppeling meer

Waarbij vanzelfsprekend een licht turbulente stroming moet worden gehandhaafd en verdere iteraties nodig kunnen blijken.

Voorbeeld:

5. Detailontwerp en nauwkeurige berekening van het drukverlies

In deze fase worden alle leidingdiameters geselecteerd en wordt het drukverlies in detail berekend. Hiervoor verwijzen we naar Rapport nr 14, hoofdstuk 7 waarbij volgende adviezen kunnen worden aangehouden:

- Als de richtwaarden voor de keuze van leidingdiameters kan men zich baseren op tabellen 24 en 25. Voor korte circuits kunnen voor de snelheden eerder de hoge waarden worden aangenomen, voor zeer lange circuits eerder de lage snelheden, ten einde de totale drukverliezen te beperken. Merk op dat er voor deze leidingen geen eis is met betrekking tot de matige turbulentie.
- Voor de bepaling van de drukverliezen kan gebruik worden gemaakt van bijlage A van rapport nr 14, of van de tabellen in bijlage ...opgesteld voor gebruikelijke fluïda (waarvoor de tabellen uit R 14, opgesteld voor zuiver en warm water, niet geldig zijn)
- Controle horizontaal

Voorbeeld:

6. Selectie van de circulatiepomp (zie ook Rapport nr 14- hoofdstuk 8)

Nog uitwerken: De pompkarakteristieken, aangeleverd door de fabrikanten, worden opgesteld voor een debiet in l/s of m³/h van zuiver water. Voor het gebruik van deze grafieken zal het massadebiet van het fluïdum (met antivries) worden gebruikt, zodat rekening wordt gehouden met een verminderde debietcapaciteit van de pomp voor deze fluïda.

Voorbeeld: een fluïdum 35 % monopropyleenglycol heeft bij 0 °C een massadichtheid van 1045 kg/m³. Een debiet van 10 m³/h stemt dus overeen met 10450 kg/h, in de pompkarakteristiek zal men dan het werkingpunt bepalen bij 10450 kg/h of 40.45 m³/h water,

De pomp wordt gekozen in functie van het gevraagde verdamperdebiet en de berekende drukverliezen, en dit op basis van de pompkarakteristieken zoals ze door de fabrikant worden aangeleverd. Daarbij moet een drukreserve van 25 % worden voorzien om rekening te houden met:

- Onnauwkeurigheden in de berekening
- Kleine wijzigingen tijdens de uitvoering
- Het gebruik van een antivriesmengsel, waardoor de pompkarakteristieken wijzigen: vraag hiervoor informatie van de fabrikant voor het betrokken fluïdum.

Bepaalde warmtepompen beschikken standaard over een ingebouwde pomp in het verdampercircuit. In dat geval beperkt de pompkeuze zich tot de controle of aan de criteria wordt voldaan (capaciteit/vermogen). Voldoet de ingebouwde pomp niet dan kan:

- Het ontwerp terug worden aangepast
- De pomp worden vervangen
- Eventueel, in overleg met de fabrikant, een pomp in serie worden geplaatst

Ten slotte zal men verifiëren of het vermogenscriterium (maximum 2.5 % van het verdampervermogen) met de daadwerkelijk geselecteerde pomp nog steeds gerealiseerd wordt.

Voorbeeld:

7. Selectie van het expansievat

Er zijn hiervoor ook eenvoudige webtools ter beschikking voorbeeld:

<http://www.lennotech.nl/calculators/drukval-leiding.htm>

Bijlage of rekenblad?

Voor de lineaire drukverliezen kan gebruikt worden gemaakt van onderstaande grafieken. Men kan ook gebruik maken van specifieke grafieken zoals ze door de leveranciers van antivries of leidingen worden aangeleverd.

Bepaal de viscositeit in functie van type, concentratie en temperatuur

VISCOSITEIT	vriespunt	ro	Minimale werkingstemperatuur (°C)			
Product:	(°C)	(kg/m ³)	-10	-5	0	5
Water	0					
Propyleenglycol 10 %	-...					
Propyleenglycol 15 %						
....						
Bietensap 10 %						

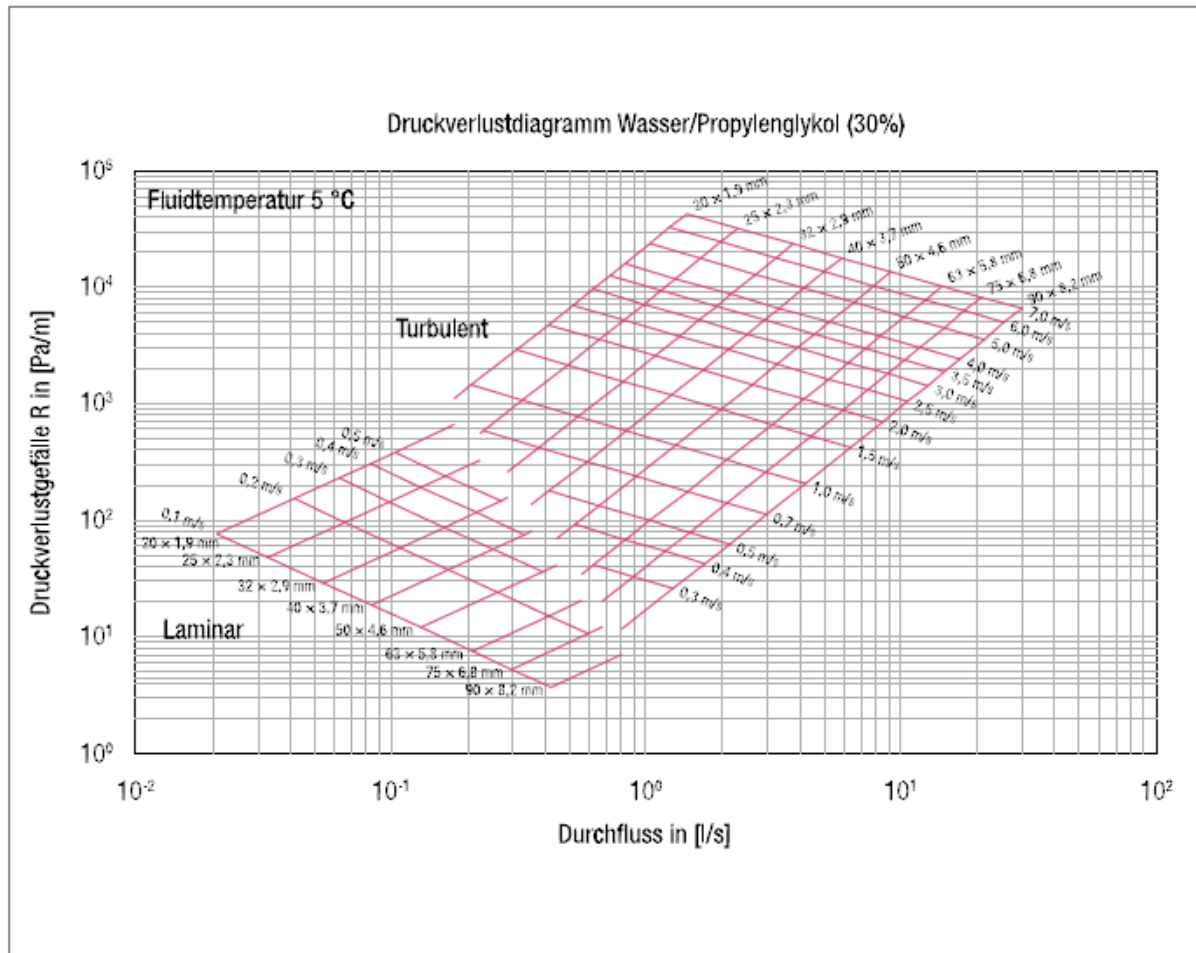
Lees vervolgens het drukverlies per m leiding af uit volgende grafiek. Verifieer daarbij ook of de turbulentie volstaat (ligt turbulent $Re > 2500?$); indien niet kan er worden gekozen voor een andere configuratie (met wijziging van debiet en lengte!) of een andere diameter.

DRUKVAL/m - Buis 32x3		Reynolds	viscositeit		
Debiet					
(l/h)	(l/s)				

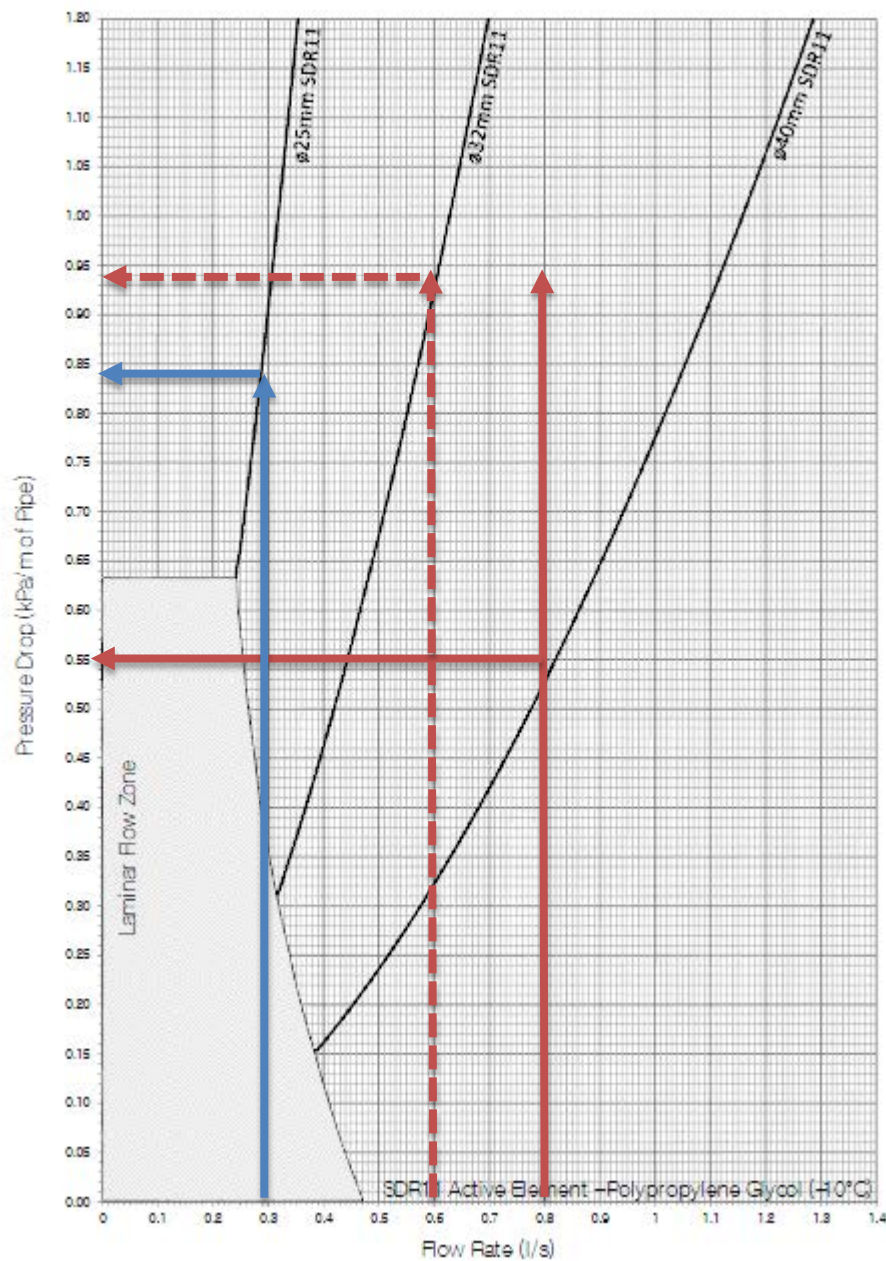
--	--	--	--	--	--

Ook opstellen voor andere diameters, of verwijzen naar xls, rekentool?

Leveranciers leveren ook grafieken waarbij de drukval kan worden afgelezen.



Figuur 54: drukverliesdiagramma, bron Rehau



Figuur 55: drukval in bodemwarmtewisselaar, bron MIS 3005²

Men dient hierbij de juiste grafiek te hanteren in functie van de bovenvermelde parameters. Bij een bepaald debiet moet men een intersectie vinden met de gekozen diameter van de warmtewisselaar die niet zich in de laminaire zone bevindt en binnen de zone van de grafiek bevindt.

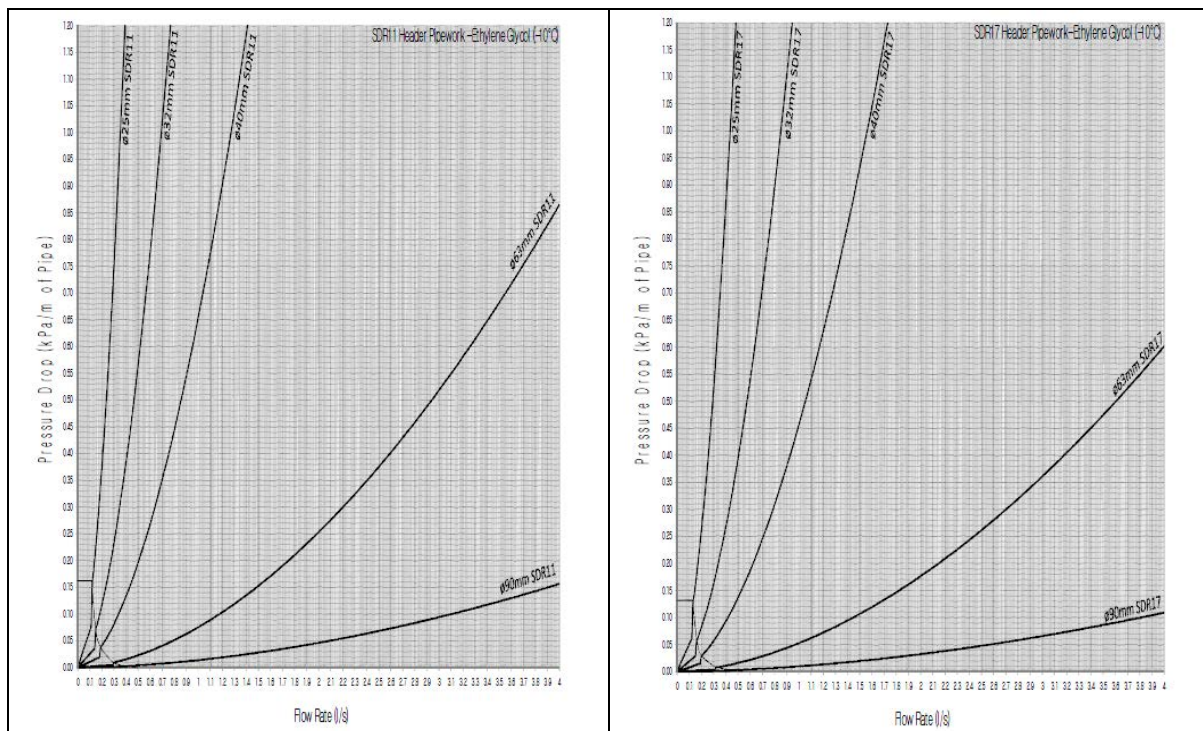
² MIS 3005, Procedure and charts for designing the hydraulics and associated pumping power of closed loop GHSP systems inder MCS, maart 2012, GeoEnergy

Men kan een geschikte intersectie vinden door aanpassing van de diameter van de bodemwarmtewisselaar, het aantal bodemwarmtewisselaars of de samenstelling van het fluïdum.

Voorbeelden:

- (rode pijlen) met een debiet van 0.8 liter/sec zal een bodemwarmtewisselaar ϕ 32mm leiden tot onaanvaardbare hoge drukverliezen (gebied buiten het diagram). Men dient in dit geval voor een bodemwarmtewisselaar leiding ϕ 40mm te opteren (resultaat 0.55 kPa/m) of het debiet te verlagen door extra parallel bodemwisselaars te plaatsen. In dit laatste geval zal een verlaging van het debiet naar 0.6 l/sec het gebruik van een bodemwarmtewisselaar ϕ 32mm wel mogelijk maken. Het drukverlies is dan 0.94 kPa/m.
- (blauwe pijlen). een debiet van 0.3 l/sec is laag voor het gebruik van een bodemwarmtewisselaar van ϕ 32mm. Men verkrijgt dan een laminaire stroming met een minder goede warmteoverdracht. Men dient te kiezen voor een bodemwarmtewisselaar ϕ 25mm. Het drukverschil is dan 0.55 mPa/m.

Onderstaande grafiek kan gebruikt worden om de drukval per lopende meter te bepalen in functie van het debiet en de gekozen diameter. Indien de drukval te hoog is (buiten het diagram) valt, kan men de gekozen binnendiameter vergroten (SDR 11 $\rightarrow$ SDR 17) of het aantal sets) leidingen vermeerderen.



De totale drukval over de horizontale leidingen is de drukval per lopende meter vermenigvuldigd met de totale lengte (heen- en retour) van één set leidingen.

Een overgedimensioneerde circulatiepomp kan de totale energieprestatie van het gehele systeem (SPF) sterk doen dalen.

Kies de pomp zodat

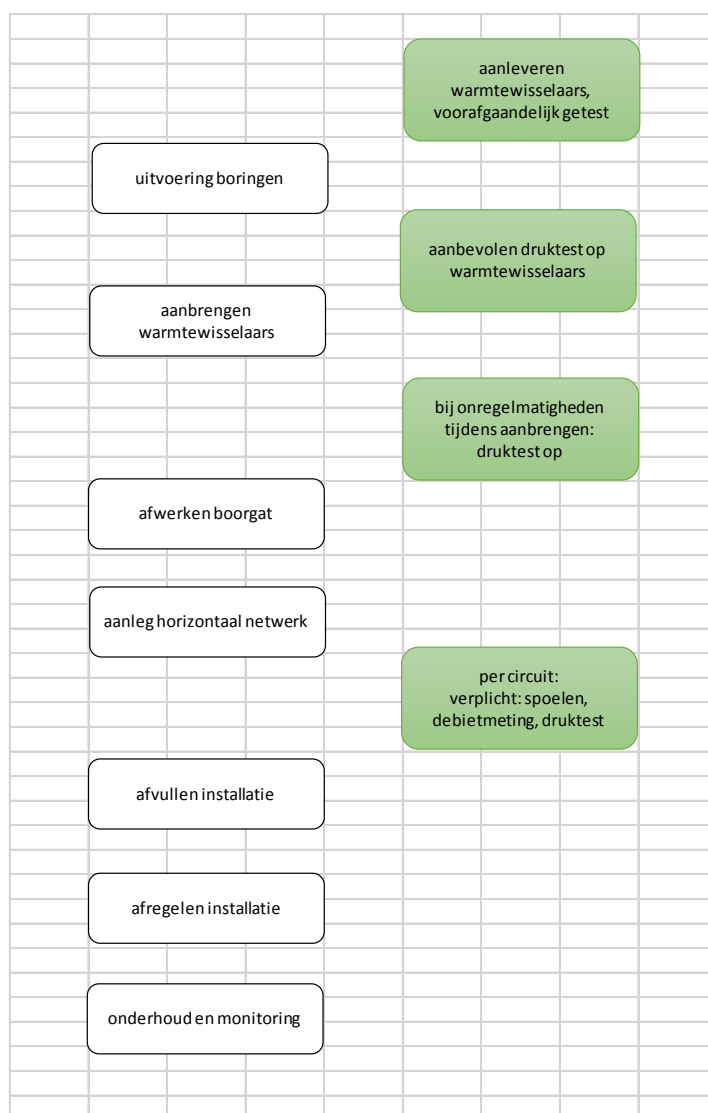
- bij het vereiste debiet de opvoerhoogte groter is dan $1.15 \times \Delta P_{\text{tot}}$
-

3.9 Bestek-lastenboek

Tenminste de volgende items worden door de ontwerper in het lastenboek vermeld en overgemaakt aan de boorfirma:

- De ligging van het project
- De beschikbare bodemgegevens
- De ligging van andere bestaande bouwelementen en nutsleidingen
- De voorziene diepte en locatie van de boringen
- Het type bodemwarmtewisselaar: enkel- of dubbelvoudige bodemwarmtewisselaar, diameter, materiaaleigenschappen, eventuele afstandhouders,
- De karakteristieken van het dragerfluidum: verhouding water/glycol
- De karakteristieken van het vulmateriaal: maximaal toegelaten permeabiliteit en de minimaal vereiste warmtegeleiding
- De configuratie van het boorveld
- De karakteristieken van de pomp aan bronzijde en eisen met betrekking tot het hydraulisch circuit (indien voorzien door boorfirma)).
- De verwachte opleveringsdocumenten inclusief de proeven die moeten worden uitgevoerd en de te bereiken grenswaarden (luchtdichtheid, hydraulische weerstand, properheid zuiverheid van het leidingnetwerk,....

4 De installatie van het bodemenergiesysteem



Figuur 56: processtappen en kwaliteitscontroles bij de installatie van een bodemenergiesysteem

4.1 Uitvoeren van verticale boringen

4.1.1 Voorbereidende werkzaamheden

De aangewezen boortechniek of combinatie van technieken wordt door de boorder vastgelegd op basis van:

- De bodemgegevens
- De voorgeschreven diepte
- De voorgeschreven (maximum) diameter

De exacte locatie van de boringen is terug te vinden op het inplantingsplan van de boringen opgemaakt door de ontwerper.

Deze locaties worden op de site uitgezet alvorens de booractiviteiten worden aangevat. Indien om welke reden dan ook, afgeweken wordt van de opgegeven locatie, wordt dit aangeduid op het inplantingsplan.

De boorfirma moet zich informeren over de aanwezigheid van ondergrondse structuren en nutsleidingen. Op basis hiervan dient hij de nodige inschatting en/of berekeningen te maken van de gevolgen van geothermische boringen zowel tijdens het boorproces als de indienststelling van de installatie.

Zo dient de boorfirma boringen uit te voeren op een zodanige afstand dat er geen negatieve invloed zal zijn op de fundering of stabiliteit van het betreffende bouwwerk.

Er dient gecontroleerd te worden of het toegestaan is om andere leidingen te kruisen met de horizontale verbindingsleidingen.

De werkzaamheden mogen pas starten als de benodigde vergunningen zijn verleend en de meldingen zijn ingediend. Zie bijlage Wetgeving en vergunningen.

Hij voorziet de nodige acties voor het maken van een boorverslag zoals wettelijk wordt voorzien.

De boorfirma bereidt het werkterrein voor zodat de toegankelijkheid en de stabiliteit van de sleuven voor het horizontaal netwerk kan worden gegarandeerd. Indien nodig legt hij hiervoor een werkplatform aan. De boorwagen moet stabiel en met voldoende ruimte kunnen worden opgesteld.

4.1.2 Dimensies en toleranties van het boorgat

4.1.2.1 Diepte

De diepte wordt bepaald door de ontwerper en volgt uit de voorstudie en de dimensionering van het boorveld.

Voor de bepaling van de totale boordiepte dient eventueel de extra lengte voor het gewicht te worden toegevoegd indien dit onderaan de bodemwarmtewisselaar wordt bevestigd.

4.1.2.2 Scheefstand

De booropstelling, met name de mast van de booropstelling, moet voldoende verticaal staan. De buizentrein (het geheel aan boorstangen) moet voldoende gewicht hebben om verticaal te boren.

Bij te weinig gewicht zal bij een toenemende kracht op de boorstangen te veel in horizontale richting geboord worden, met een grotere boorgatdiameter als gevolg. Als de boorstangen zelf niet genoeg wegen, moet men immers een extra neerwaartse kracht uitoefenen met de machine, waardoor de stangenreeks kan uitknikken.

Risico's op het mogelijk raken van een al geplaatste wisselaar moeten worden vermeden.

4.1.2.3 Verontreinigingen

Indien vooraf of tijdens het boren, bodemverontreinigingen worden vastgesteld (voorbeeld door olie op het circulerend boorwater), dienen er maatregelen te worden genomen om verdere verspreiding van en blootstelling aan de verontreiniging te vermijden.

De verontreinigde materie moet conform de regelgeving voor verwerking worden afgevoerd. Indien de aangetroffen verontreiniging niet gekend is dient de eigenaar, exploitant, gebruiker van het terrein op de hoogte gesteld te worden van het aantreffen ervan.

Bij het vaststellen van sterke verontreinigingen moeten spoelboringen onmiddellijk worden stilgelegd en dient verder overleg te worden gepleegd met de betreffende overheid.

Voorafgaand de start van de werken kan het aangewezen zijn de nodige opzoeken te verrichten ten einde zekerheid te verkrijgen of er in de onmiddellijke omgeving van de geplande werken bodemdossiers gekend zijn. Op basis hiervan kan men uitsluitend verkrijgen omtrent de mogelijke aanwezigheid van bodemverontreiniging

4.1.3 Uitvoeren van boringen

Het uitvoeren van een boorgat van goede kwaliteit vereist een technische kennis en goed vakmanschap. Richtlijnen hiervoor zijn onder andere terug te vinden in Vlare II, Bijlage 5.53.1 Code van goede praktijk voor boringen en voor exploiteren en afsluiten van boorputten voor grondwaterwinning

De keuze van de boortechniek wordt bepaald door een aantal factoren zoals de vereiste diepte en diameter, de bodem, de grondwaterstand, enz.

Zo kan het bij instabiele grond noodzakelijk zijn om een casing (verbuizing van het boorgat) of een aangepaste boorvloeistof toe te passen.

De meest voorkomende boortechnieken die verder besproken worden zijn:

- Spoelboringen
 - o Directe spoeling
 - o Omgekeerde spoeling

- Hamerboren

Minder frequente boortechnieken zoals avegaar boren, slagboren, indrukken en sonisch boren of intrillen, worden beschreven in bijlagen.

In bijlage (Tabel 12: overzicht boortechnieken) wordt een overzicht gegeven van de meest relevante en frequent toegepaste boortechnieken.

4.1.4 [Spoelboringen](#)

De spoelboring is, behalve over de eerste meters, een onverbuisde boortechniek waarbij met een roterende getande boorbeitel die bevestigd is aan een holle boorbuis, de grond wordt losgemaakt. Het losgeboorde materiaal wordt door middel van een vloeistof naar boven getransporteerd. Deze vloeistof of spoeling dient niet alleen om het losgeboorde materiaal te verwijderen, maar ook om de boorgatwand stabiel te houden.

Als spoelwater wordt er leidingwater of gecontroleerd putwater gebruikt om verontreiniging van het grondwater volledig uit te sluiten.

Men maakt een onderscheid tussen verschillende spoelboringen afhankelijk van de manier waarop de spoeling circuleert.

- Directe spoeling of direct flushing of straight flush
- Omgekeerde spoeling of reversed flush of zuigboren

4.1.4.1 *Directe spoeling of direct flushing of straight flush of spuitboring*

Met behulp van een pomp wordt water uit een spoelput of spoelbak opgezogen en onder druk door de holle boorbuis naar beneden gevoerd.

De roterende boorkop met de beitel maakt de grond los. Het water stroomt door de boorkop en stuwt het losgemaakte materiaal langs de annulaire ruimte tussen de boorstangen en het boorgat omhoog naar het maaiveld. Tegelijkertijd stabiliseert het boorwater de boorgatwand.

Ter hoogte van het maaiveld komt het water met boorresten door een stalen mantelbuis via een decantatiegoot terug in de spoelput terecht. Hier worden de vaste bestanddelen zoveel mogelijk van het water gescheiden. Grotere resten worden vooraf eventueel afgezeefd.

De boorresten bezinken in de spoelbak of –put. De fijne delen worden eventueel verder afgescheiden door middel van een hydrocycloon. Het water wordt herbruikt en opnieuw in de boorstangen geïnjecteerd. Vanaf het moment dat een eerste boorbuis met een lengte van 2.50 tot 3.00m over zijn volledige lengte in de grond is geboord, wordt de circulatie van de spoeling stopgezet en wordt de volgende boorbuis aan de vorige bevestigd.

In sommige gevallen wordt er eerst droog voorgeboord tot aan het grondwater met behulp van een avegaarboor waarna men een stalen mantelbuis in het boorgat laat zakken.

Bij directe spoelboring is het belangrijk de juiste stijgsnelheid in de annulaire ruimte onder controle te kunnen houden. Bij te hoge snelheden wordt het boorgat beschadigd, bij te lage snelheden is de transportcapaciteit te laag met obstructies als gevolg.

Als het boorgat op de juiste diepte is gebracht kunnen de boorstangen uit het boorgat worden gehaald.

Er is geen circulatie van de spoeling meer. Het boorgat moet op overdruk worden gehouden met water en voorkomt dat de wanden inzakken.

Indien noodzakelijk voor de stabiliteit van het boorgat, kan de spoelboring ook verbuisd worden uitgevoerd, waardoor geen gevaar meer bestaat dat het boorgat instort. Dit heeft echter wel als nadeel dat de kosten toenemen en de maximale haalbare diepte afneemt. Dit kan vermeden worden door de verbuizing getrapt uit te voeren met de grootste diameter bovenaan.

Om dezelfde reden mogen er ook stabiliseerders bij het boorwater worden toegevoegd voor zover zij geen negatieve impact hebben op het warmtegeleidend vermogen van de ondergrond.

Ook om het waterverlies in goed doorlatende lagen te beperken kan het boorteam aan de boorvloeistof additieven toevoegen.

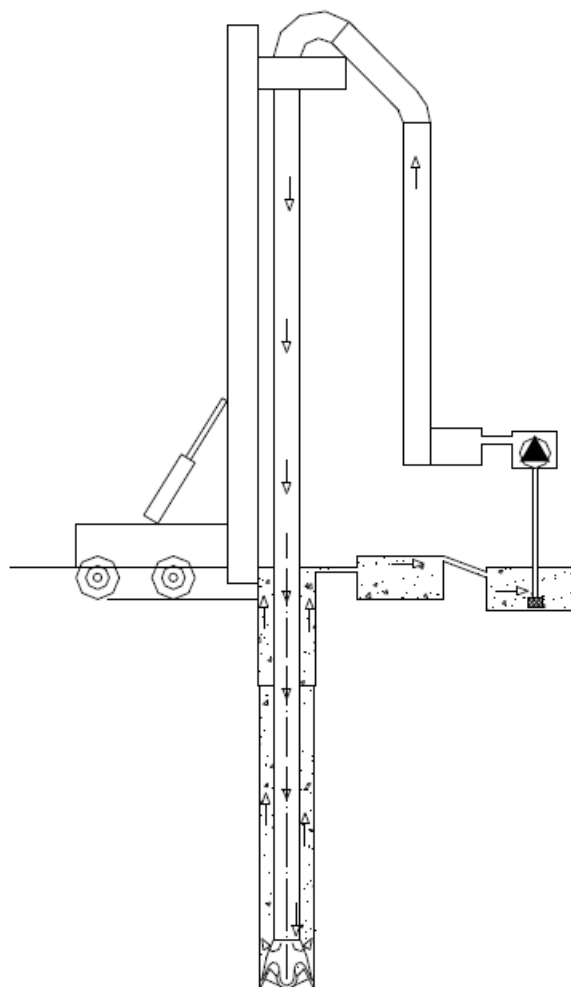
De boorgatdiameter wordt beperkt door de benodigde opwaartse stroomsnelheid van de boorvloeistof in het boorgat; deze snelheid moet voldoende zijn om het los geboorde materiaal naar het maaiveld te transporteren. Bij de gebruikelijke boorstangen met diameter van 60 – 140 mm bedraagt de maximale boorgatdiameter ongeveer 100 - 350 mm. Maximale boordiepte > 500 meter.

De snelheid kan in losse formaties ettelijke tientallen meters per uur bedragen.

Deze boortechniek wordt dan ook veel toegepast voor het plaatsen van verticale bodemwarmtewisselaars.

Voordelen van deze boormethode zijn dan ook:

- Snelle boormethode
- Mogelijk tot op grote diepte
- Goedkoop en veel toegepast



Figuur 57: schematisch principeschema spoelboren.
Bron: VITO

Nadelen van deze boormethode zijn:

- Tenzij de boorinstallatie uitgerust is met bijzondere apparatuur voor monitoring, is er een minder nauwkeurige beschrijving van de bodem aan de hand van de boorspecie mogelijk dan bijvoorbeeld bij omgekeerde spoeling (zie verder).
- Waterverbruik afhankelijk van de gebruikte werkmethode en toepassing van additieven.
- Ontspanning van de grond is mogelijk
- Boren door verontreiniging geeft aanleiding tot verspreiding van de verontreiniging

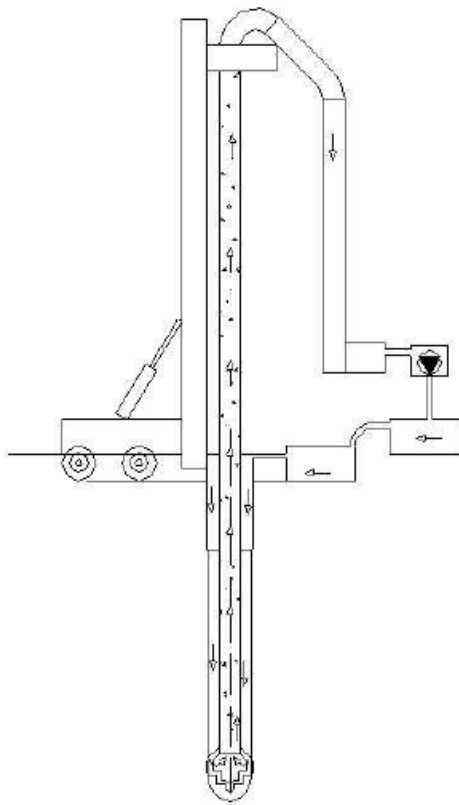
4.1.4.2 Omgekeerde spoeling of reversed flush of indirecte boring of zuigboring

In tegenstelling tot een directe spoelboring waarbij de neerwaartse watertoevoer via de boorstangen verloopt en de bij de boring vrijkomende grond via de ruimte tussen de boorstangen en de boorwand (de zogenaamde annulaire ruimte) omhoog wordt getransporteerd, verloopt bij deze methode de wateraanvoer via de annulaire ruimte en komt de vrijkomende grond omhoog door de boorstangen.

De spoelbakken worden m.b.v. een overstort verbonden met de stalen mantelbuis in het boorgat. Het water loopt via de overstort naar de stalen mantelbuis in het boorgat. Met behulp van een zuigpomp op de boormachine wordt het spoelwater uit het boorgat opgezogen door de boorstangen. Vanuit de boorstangen gaat de opgeboorde grond en water door de pomp naar de spoelbakken. De grond bezinkt in de spoelbakken en het water loopt via de verbindingsbuis terug in het boorgat.

Bij de gebruikelijke boorstangen met een diameter van 125 - 150 mm bedraagt de maximale boorgatdiameter ongeveer 1.2 à 1.5 m. De maximale diepte bij zuigboren bedraagt ongeveer 100 meter.

De monsterneming van het opgeboorde materiaal vindt plaats uit de circulerende boorvloeistof. Het betreffen geroerde monsters.



Voordelen :

- snelle boormethode (grote boorsnelheid) in vergelijking tot verbuisde boormethodes, maar trager dan spoelboring
- mogelijk tot op grote diepte
- de stijgsnelheid van de boorvloeistof is beter onder controle te houden is, vooral bij grotere diameters.
- goedkoop in vergelijking met boormethodes die een verbuizing vereisen
- betere kwaliteit van staalname, het is gemakkelijker de diepte te bepalen vanwaar de cuttings afkomstig zijn.
- zeer lage weerstandsverhoging ter hoogte van het boorgat ten gevolge van het relatief zuivere spoelwater en het ontbreken van verbuizing
- Door de lage snelheid in de annulaire ruimte is er minder kans op beschadiging van het boorgat.

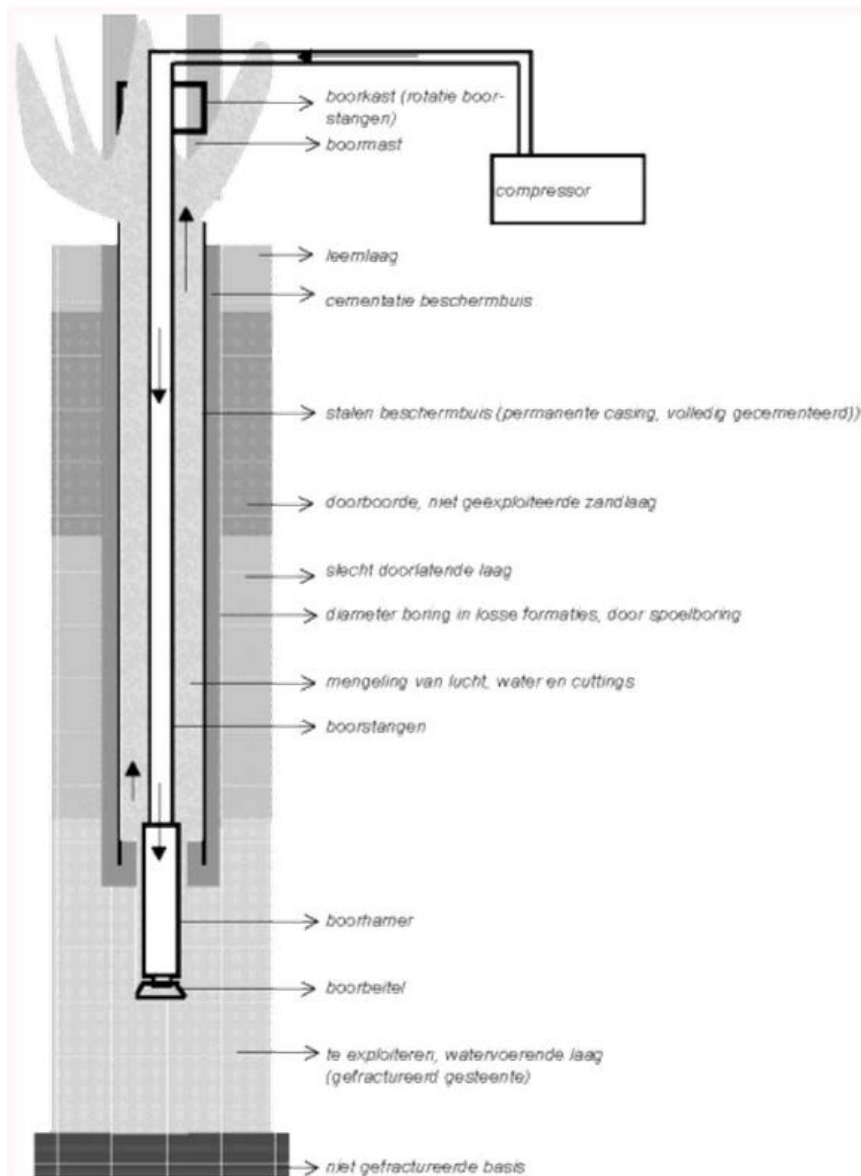
Nadelen :

- waterverbruik
- ontspanning van de grond is mogelijk
- geroerde monsters

Figuur 58: schematisch principeschema zuigboren. Bron VITO

- boren door verontreiniging geeft aanleiding tot verspreiding van de verontreiniging
- lagere boorsnelheid
- bij elke buiswisseling dient de laatst opgezette buis luchtledig gepompt worden. Om die reden worden ook kortere buizen gebruikt, wat meer manipulaties vraagt.

4.1.5 Hamerboren



Figuur 59: hamerboren, bron VLAREM

Doorheen boorstangen wordt gecomprimeerde lucht gestuwd die onderaan een pneumatische hamer aandrijft. De boorstangen brengen bovendien een roterende beweging over van de boorkast naar de hamer. De boorbeitel verbrijzelt gelijktijdig het gesteente door percussie.

Het verbrijzelde gesteente wordt door de luchtstroom via de annulaire ruimte tussen stangen en boorgatwand naar het maaiveld gevoerd.

Zolang er geen grondwater is, wordt dit materiaal droog naar boven getransporteerd. Zodra het waterpeil bereikt is, wordt het grondwater mee naar boven geblazen waardoor bij voldoende grondwater een goede reiniging van het boorgat ontstaat.

Er is geen boorspecie aanwezig om het boorgat via hydrostatische druk open te houden. Daarom kan alleen in niet gescheurde stabiele rotspartijen hamerboren zonder verbuizing worden toegepast. In sedimentaire afzettingen wordt deze techniek daarom meestal gecombineerd met spoelboringen waarbij een verbuizing wordt aangebracht tot op de rotsformatie.

Ook in grind, steenpuin, sterk gescheurde rotsmassieven is een verbuizing van het boorgat noodzakelijk om de boorgatwand te stabiliseren.

Voordelen :

- geen toevoer van bodemvreemde stoffen
- weinig waterverbruik
- goede boorbeschrijving mogelijk
- kan gebruikt worden om steenpuin en grindformaties te doorboren

Nadelen :

- bijzonder materieel is vereist
- verhuizing is veelal noodzakelijk
- niet toepasbaar in sedimentaire grondlagen zoals zand en klei

Het rendement hangt van vele factoren af, maar kan in de meest gunstige omstandigheden verschillende tientallen meters per uur bedragen.

Met deze boortechniek kan men onder een hoek van 45° boren, hoewel boorgaten van 10 tot 20° meer gebruikelijk zijn. Indien men niet gestuurd boort, heeft men een afwijking in rechtheid van 10 à 15%.

Een ander nadeel van deze techniek is het ontstaan van scheuren die dichtbij elkaar gelegen boorgaten met elkaar kunnen verbinden. De luchtdruk kan daardoor reeds geboorde gaten beschadigen.

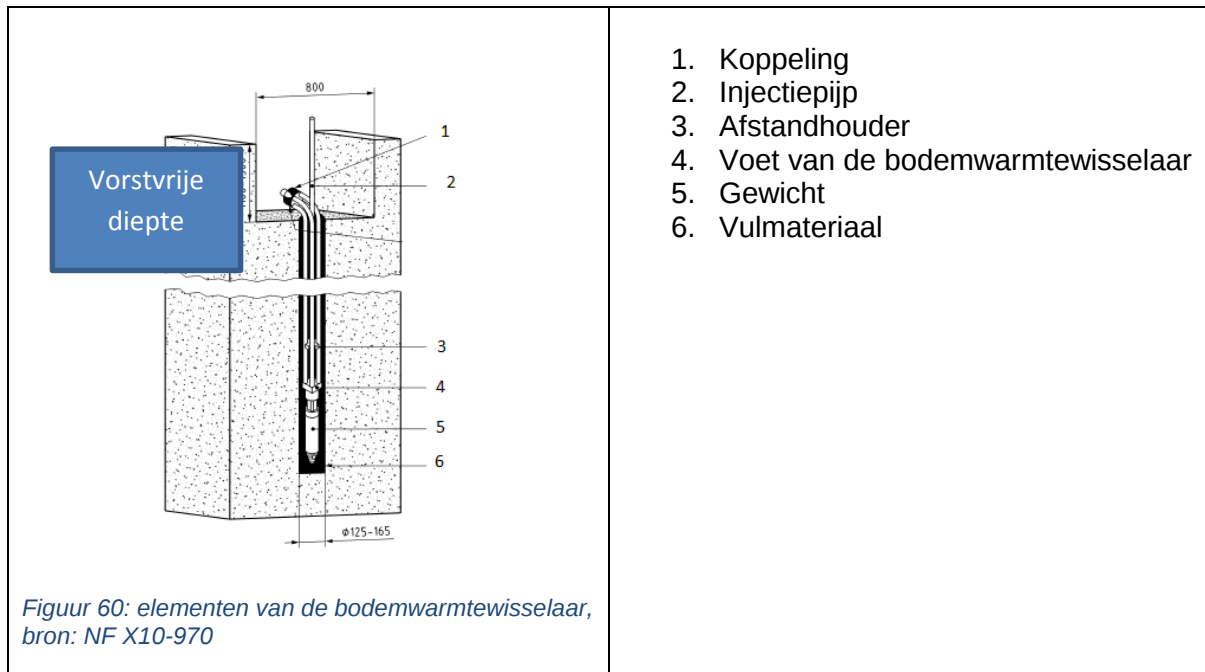
Voor diepe gaten in kristallijne rotsen en in gebieden met jonge sedimentaire rotsen vindt hamerboren met water meer en meer ingang.

4.1.6 Verslaggeving

De boorder maakt het boorverslag op zoals wettelijk voorzien met aanduiding van de locatie van de boringen en de situering van de verschillende doorboorde grondlagen.

4.2 Aanbrengen van de bodemwarmtewisselaar

4.2.1 Beschrijving verticale bodemwisselaar



Het type bodemwarmtewisselaar wordt bepaald door de ontwerper van het bodemenergiesysteem. Ze voldoen aan de eisen beschreven in paragraaf **Materiaaleisen** 3.6.2.2

De bodemwarmtewisselaars zijn vooraf vervaardigd en getest en worden dus niet op de werf samengesteld of gelast.



Figuur 61: gewicht onderaan de bodemwisselaar, foto firma Energie Verbeke.

De onderzijde van de U-bocht wordt voorzien van een gewicht zodat de bodemwarmtewisselaar gemakkelijker in een met water of slibgevuuld boorgat kan worden geplaatst. Om diezelfde reden wordt de bodemwarmtewisselaar vooraf met water gevuld. Bovendien worden op deze manier eventuele vervormingen van de bodemwarmtewisselaar tijdens het aanvullen van het boorgat vermeden.

Het gewicht dat moet worden aangebracht is afhankelijk van het niveau en het soortelijk gewicht van de vloeistof die zich in het boorgat bevindt, de lengte van de bodemwarmtewisselaar, de wrijvingsweerstand met de boorwand enz..

Het gewicht heeft een minimale massa van

0.75kg per lopende meter bodemwarmtewisselaar. Het gewicht mag op termijn geen bron van bodemverontreiniging vormen.

4.2.2 Controles van de bodemwarmtewisselaar voor het inbrengen

Visuele controle

Bij aanvoer van het materiaal wordt ervoor zorggedragen dat het materiaal schoon en onbeschadigd is. Men moet vermijden dat het materiaal lange tijd in het directe zonlicht wordt opgeslagen.

Warmtewisselaars worden voor gebruik visueel geïnspecteerd. Vooral de aangelaste voet dient grondig te worden geïnspecteerd.

Beschadigde bodemwarmtewisselaars of leidingmateriaal worden niet toegepast. Onder een beschadigde lus wordt verstaan een lus met een knik of met een kras dieper dan 10 % van de wanddikte voor PE100-leidingen. Voor PE-XA leidingen wordt een kras tot een diepte van 20% van de wanddikte getolereerd.

Een beschadigde lus wordt vervangen.

Druktest

Om beschadigingen tijdens transport en opslag tijdig te traceren, wordt er sterk aanbevolen om de bodemwarmtewisselaars voor de installatie met water te vullen en aan een proefdruk te onderwerpen van minimum 3 bar. Deze druk moet minstens 15 minuten worden aangehouden. Het drukverlies moet minder zijn dan 0.2 bar of 10%. De resultaten worden geregistreerd.

4.2.3 Inbrengen van de bodemwarmtewisselaar

De bodemwarmtewisselaar wordt gevuld met water en afgedicht om vervormingen en het opdrijven te voorkomen.

Zelfs in geval van droge boorgaten is het aan te raden om de wisselaar met water te vullen dat voldoet aan de milieukwaliteitseisen voor grondwater om te vermijden dat deze tijdens het opvullen van het boorgat opdrijft.



Figuur 62: inbrengen van de bodemwarmtewisselaar, foto firma Energie Verbeke

De bodemwarmtewisselaar samen met de injectiepijp voor het afvulmateriaal (zie verder) worden voorzichtig en verticaal in het boorgat neergelaten met behulp van een haspel of geleidingswiel zodat beschadigingen zoals knikken of krassen worden vermeden.

Indien de bodemwarmtewisselaar langer is dan 150m is het aan te bevelen om de haspel te voorzien van een rem zodat het geheel langzaam en voorzichtig in het boorgat kan worden gelaten.

Tijdens het neerlaten van de bodemwarmtewisselaar wordt deze nogmaals op visuele gebreken gecontroleerd.

Omdat het boorgat tijdens de fase volledig open is, moet men voorkomen dat verontreinigingen afkomstig van het oppervlak in het boorgat stromen of vallen.

De bereikte einddiepte wordt genoteerd aan de hand van markeringen op de bodemwarmtewisselaar.

De lus wordt afgesneden op de juiste lengte en afgetapet. Indien de bodemwarmtewisselaar op een plek staat waar verkeer aanwezig is, moet het uitstekend eind op adequate wijze gemarkeerd of afgewerkt worden zodat beschadigingen worden vermeden.

Indien er onregelmatigheden plaatsvonden tijdens het inbrengen van de bodemwarmtewisselaar of bij sterke steenachtige ondergrond, is het aan te bevelen om een extra druktest uit te voeren van minimum 3 bar.

4.3 Afwerken van het boorgat

4.3.1 algemeen

Het vulmateriaal dat de bodemwarmtewisselaar omhult, bestaat uit één of meerdere volgende bestanddelen:

- bentoniet
- cement
- zand
- hulpstoffen
- water

De bestanddelen bepalen volgende belangrijke eigenschappen van het vulmateriaal:

- de thermische geleidbaarheid
- de permeabiliteit
- de duurzaamheid met o.a. de vorstbestandheid
- de verpompbaarheid

De ontwerper bepaalt in zijn bestek de minimale aanvaardbare thermische geleidbaarheid en de maximale toelaatbare permeabiliteit van het vulmateriaal.

Een attest van het vulmiddel en de aangetoonde doorlatendheid na uitharden en de vorstbestendigheid ervan, wordt bijgevoegd bij het boorverslag dat wordt opgemaakt

4.3.2 Thermische geleidbaarheid

De minimum thermische geleidbaarheid wordt vastgelegd in de technische specificaties van het project.

Algemeen wordt gesteld dat de thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal minstens deze van de omliggende grond moet benaderen.

Een hoge thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal zorgt voor een efficiënte warmte-uitwisseling tussen het fluïdum en de boorwand.

De thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal wordt niet enkel bepaald door de materiaaleigenschappen van de samenstellende bestanddelen, maar hangt ook af van een degelijk contact tussen de bodemwarmtewisselaar en het vulmateriaal enerzijds en tussen het vulmateriaal en de boorwand anderzijds.

Een slecht contact kan veroorzaakt worden door

- Krimp van het vulmateriaal
- Uitdroging of ontwatering van het vulmateriaal
- Holten ontstaan tijdens een onzorgvuldige plaatsing

Hogere watergehaltes in cementgrouts verhogen de verpompbaarheid, maar verlagen de thermische geleidbaarheid en verhogen de permeabiliteit

Pure bentoniet en cement-gebaseerde grouts hebben een betrekkelijk lage thermische geleidbaarheid

Grouts met een hoog **kwartsgehalte** hebben een hoge thermische geleidbaarheid

Portland cement gebaseerde grouts hebben de neiging om te krimpen waardoor er een holte ontstaat ter plaatse van de bodemwisselaar.

De testmethoden ter bepaling van de thermische geleidbaarheid zijn terug te vinden in bijlage:....

4.3.3 Permeabiliteit

De permeabiliteit of hydraulische conductiviteit is een materiaaleigenschap die beschrijft in welke mate een vaste stof een andere stof, in dit geval een vloeistof, doorlaat.

Men spreekt van een afdichtend vulmateriaal of grout als de doorlatendheid maximaal 10^{-8} m/s (of 10^{-6} cm/s) is³

Het grout moet een permeabiliteit hebben die minstens een ordegrootte kleiner is dan de oorspronkelijke bodem, lager dan 10^{-6} cm/s is echter niet nodig.

De permeabiliteit van het vulmateriaal wordt niet enkel bepaald door de materiaaleigenschappen van de samenstellende bestanddelen, maar hangt ook af van het watergehalte van het vulmateriaal.

Hoe lager het watergehalte van het grout, hoe lager de permeabiliteit. Er moet echter voldoende water aanwezig zijn om een goede verdichting en hydratatie te garanderen.

Het gebruik van een (super-)plastificeerder kan hierbij goede resultaten opleveren

Bentoniet gebaseerde grouts

Een lage permeabele grout kan voorzien worden door een klei-matrix zoals bentoniet. Hoe hoger het gehalte aan vaste stof, hoe lager de permeabiliteit

Cement gebaseerde grouts

Hoogovencement is beter dan portlandcement omdat er meer cementgel gevormd wordt.

Hoe ouder de cementgrout, hoe lager de permeabiliteit

Hoe fijner de korrels van het toeslagmateriaal, hoe lager de permeabiliteit. De aanwezigheid van toeslagstoffen zoals silica fume doet de permeabiliteit dalen.

³ [Vlaamse Reguleerder voor de Media, Artikel 5.55.2.5. § 1](#)

Voor een gegeven korreldiameter is een niet-uniforme korrelverdeling minder permeabel dan een uniforme verdeling.

Algemeen

Grouts met een hoog kwartsgehalte en een voldoende hoog cement of bentoniet-gehalte hebben niet alleen hoge thermische geleidbaarheid, maar verzekeren ook een lage permeabiliteit.

De colloïdale eigenschappen van de fijne delen verlagen immers de permeabiliteit.

Testmethoden

DIN 18130-1: Laboratory tests for determining the coefficient of permeability of soil.

ASTM D 5084: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.

4.3.4 Duurzaamheid

Het grout moet een levensduur hebben als hydraulische barrière die minstens deze van de wisselaar is. De krimp, de vorstbestandheid en de verpompbaarheid zijn hierin belangrijke factoren die verder meer in detail worden besproken.

Algemene voorwaarden

- Het grout mag geen verontreinigingen bevatten.
- Het grout moet chemisch en fysisch compatibel zijn met de wisselaar en de bodem om voldoende hechting tussen de wisselaar en het grout enerzijds en tussen het grout en de grond anderzijds te verkrijgen.
- Het grout moet voldoende snel hydrateren en een sterkte ontwikkelen om te weerstaan aan de hydraulische axiale krachten
- Het grout moet het vermogen hebben om de vervormingen van het boorgat of de wisselaar te kunnen volgen. De vervormingen kunnen het gevolg zijn van grondzettingen of thermische veranderingen van de wisselaar.
- Aangezien het dragermedium dat doorheen de bodemwarmtewisselaar stroomt een negatieve temperatuur kan bereiken, wordt opgelegd dat het vulmiddel vorstbestendig moet zijn om een perfecte afdichting tussen de verschillende watervoerende lagen ook op langere termijn te kunnen garanderen.

Krimp

Door krimp kunnen er holten ontstaan tussen enerzijds de bodemwarmtewisselaar en het grout en/of anderzijds tussen het grout en de boorwand. Lucht in deze holten is een slechte geleider waardoor de thermische geleidbaarheid van het geheel afneemt.

Bentoniet-grout zal krimpen en loskomen van de boorwand als er teveel water verloren gaat in de omringende droge bodem. Als dit gevaar van krimpen bestaat, is het best om over te

gaan naar een bentoniet-zandmengsel en een zo hoog mogelijk gehalte vaste stof te gebruiken.

Als cement reageert met water komt er warmte vrij (hydratatiewarmte). Deze warmte kan de bodemwarmtewisselaar doen uitzetten en krimpen zodat er microholtes achterblijven in het grout.

Cementgebaseerde grouts hebben geen duurzame fysische en thermische hechting met het kunststof leidingmateriaal. Dit is ten nadele van een goede thermische geleidbaarheid en permeabiliteit.

Omwille van bovenstaande redenen worden cement-grouts gemodificeerd met bijvoorbeeld zand en/of andere producten zoals plastificeerders, vertragers of bentoniet

Vorstbestandheid

Aangezien het dragermedium dat doorheen de bodemwarmtewisselaar stroomt een negatieve temperatuur kan bereiken, wordt opgelegd dat het vulmiddel vorstbestendig moet zijn om een perfecte afdichting tussen de verschillende watervoerende lagen ook op langere termijn te kunnen garanderen.

De methode voor het testen van de vorstbestandheid wordt beschreven in bijlage...

4.3.5 Verpompbaarheid

Algemeen

Het vulmateriaal zal naar de bodem van de boorput worden verpompt. Slecht verpompbare vulmateriaal zal leiden tot het ontstaan van holtes hetgeen een negatieve invloed heeft op de thermische geleidbaarheid en de permeabiliteit.

De viscositeit bepaalt de verpompbaarheid van het vulmateriaal.

Het is een fysische materiaaleigenschap, die de traagvloeibaarheid of *stropigheid* van een vloeistof of van een gas weergeeft.

Het vulmateriaal moet een lage viscositeit hebben om een adequate plaatsing ter verzekeren.

Bepalende factoren

Watergehalte

Hoe hoger het watergehalte, hoe lager de viscositeit

Fijn materiaal

Fijn kalksteenmeel werkt als een “smeermiddel” en verbetert de verwerkbaarheid, meer bepaald wanneer dit gepompt moet worden. De toevoeging van kalksteenmeel verleent aan het cement een goed vermogen om water vast te houden, waardoor de risico's op ontmenging worden beperkt, het verdichten wordt vergemakkelijkt en het grout duurzamer wordt.

Bentoniet

Cement-bentoniet mengsels zijn gemakkelijker te verwerken dan pure bentoniet-grouts. Ze hebben een langere verwerkingstijd en zijn minder gevoelig voor de gebruikte mengmethode en afwijkingen t.o.v. het ontwerpmengsel. Het mengsel is gemakkelijk aan te passen aan variaties in temperatuur, pH en zuiverheid van het water.

Pure bentoniet mengsels echter moeten zorgvuldig gedoseerd en gemengd worden.

De viscositeit en verpompbaarheid van zand-betoniet mengsels zijn afhankelijk van het type bentoniet en de verhouding zand/bentoniet.

Zandgranulaat

Verhoging van de zandfractie verhoogt de viscositeit en bemoeilijkt de verpompbaarheid.

Bij de selectie en de specificatie van een grout dat geplaatst wordt met de conventionele pomp en stortpijp methode, moet men rekening houden met de meng- en verpompeigenschappen van het grout in de slurryvorm.

In vele gevallen zijn de boorgaten relatief diep en vereisen een stortpijp. In dat geval zal een grout met een hoge viscositeit resulteren in hoge pompdrukken.

Testmethoden

De Marsh funnel



De vloeibaarheid wordt gemeten door de Marsh funnel. Terwijl men de onderzijde van de trechter met de vinger dichthoudt, wordt 1 liter van het grout door de zeef gegoten. De tijd dat de trechter leeg stroomt, is een maat voor de viscositeit. Marsh viscositeiten tussen 40 en 100 seconden worden beschouwd als goed verwerkbaar grouts.

norm: EN ISO 13500: Petroleum and natural gas industries — Drilling fluid materials — Specifications and tests — Barite 4,1

Druk op de pomp

De druk die ontwikkeld wordt door de pomp tijdens het plaatsen van het grout is een belangrijke kwaliteitsparameter die aangeeft of het grout degelijk gedoseerd en gemengd is.

Als de pompdruk te hoog is, dan kan dit wijzen op te warm aanmaakwater of een te hoog gehalte aan vast materiaal. Is de pompdruk lager dan normaal, dan is er teveel aanmaakwater gebruikt en daalt de kwaliteit van het grout.

4.3.6 Beschrijving van grouts

4.3.6.1 Pure bentoniet

Bentoniet is een natuurlijk voorkomend kleimineraal dat al veel jaren in de grondwaterwinning wordt toegepast. Het is in vele vormen beschikbaar (chips, pellets, poeder, grove en fijne granulaten) en kan worden gegoten of verpompt.

Bentoniet geeft een flexibele hechting met **een lage permeabiliteit** (lager dan 10^{-7} cm/s of 10^{-9} m/s) en ontwikkelt geen hydratatiewarmte.

Hoewel het een **lage thermische geleidbaarheid** heeft (0.64-0.74 W/m²K), kan het gebruikt worden in formaties met een gelijkaardige of lagere thermische geleidbaarheid. Er bestaat evenwel thermische verbeterde kleikorrels op basis van grafiet met een thermische geleidbaarheid groter dan 2.4 W/m²K.

Als het grondwater een totale hardheid heeft groter dan 500ppm (500°FH, 28°dH) en/of een chloride concentratie groter dan 1500ppm, is bentoniet niet de beste keuze omdat de hardheid en de chlorideconcentratie de zwellingscapaciteit van de klei aantast.

Als bentoniet grout wordt geplaatst in een verzadigd of relatief vochtig boorgat, dan zal deze een goede sluiting vormen over een oneindig lange periode. Maar als dit product wordt gebruikt in een droge grond gecombineerd met een significante warmte-onttrekking, dan bestaat de kans dat het bentoniet zijn water verliest. Zonder bescherming tegen dit fenomeen, zal het bentoniet wegkrimpen van de boorwand afhankelijk van de hoeveelheid water dat verloren gaat en de oorspronkelijke hoeveelheid vast materiaal. Als dit gevaar van krimpen bestaat is het best om een zo hoog mogelijk gehalte vaste stof te gebruiken.

4.3.6.2 Bentoniet/zand mengsels

Bentoniet/zandmengsels zijn de meest verspreide grouts voor geothermische toepassingen. Ze hebben een **lage permeabiliteit** en een **hogere thermische geleidbaarheid** dan pure bentoniet. Hoe hoger het gehalte aan zand, hoe beter de geleidbaarheid. Deze mengelingen hebben wel een specifieke meng- en pompinstallatie nodig. Het is immers belangrijk dat het bentoniet goed vermengd is met het zand om een goede thermische geleidbaarheid te verkrijgen. Bovendien staat het bentoniet door de lage permeabiliteit in voor de bescherming van het grondwater.

Silicaatzand heeft ongeveer hetzelfde effect als kwartzand: het verdubbelt de thermische geleidbaarheid t.o.v. pure bentoniet.

Het zand moet meer dan 99% silica bevatten. Zand met een lager silicaatgehalte kan een lagere en een niet-uniforme thermische geleidbaarheid hebben.

Het gebruik van te grof zand (>2mm) kan uitzakkingen in het mengsel veroorzaken, hetgeen de thermische geleidbaarheid negatief beïnvloedt. Bovendien heeft grof zand een lagere thermische geleidbaarheid omdat het minder contactpunten heeft met de omliggende korrels dan fijn zand.

Te fijn zand (< 125 µm) heeft echter ook nadelen: het kost meer en verhoogt de viscositeit omdat er een grotere interactie is tussen de korrels.

De hoeveelheid water is ook kritisch. Teveel water leidt tot het uitzakken van de bestanddelen en verlaagt de thermische geleidbaarheid.

De aanwezigheid van zand vermindert de kans op krimp bij droge omstandigheden en maakt het grout meer stabiel. Het zand verlaagt echter de permeabiliteit en maakt het grout moeilijker verpompbaar.

4.3.6.3 Cement-gebaseerde grouts

Cement-gebaseerde grouts zijn interessant in omgevingen met een hoge hardheid en chloride-gehalte. Ze geven een starre, **laag permeabele grout** met een zekere druksterkte.

Pure cementmengsels hebben **een lage thermische geleidbaarheid** (0.80-0.90 W/m°K)

Het type en de fijnheid van het cement bepalen de eigenschappen van deze grout.

De geleidbaarheid kan variëren in functie van de fabrikant, de densiteit van de cementslurry en de verhardingstemperatuur.

Als cement reageert met water komt er warmte vrij (hydratatiwarmte). Deze warmte kan de bodemwarmtewisselaar doen uitzetten en inkrimpen zodat er micro holtes achterblijven in het grout. Lucht in deze holten is een slechte geleider waardoor de thermische geleidbaarheid van het geheel afneemt.

Cement heeft water nodig om te binden. In poreuze gronden kan het grout ontwateren waardoor er geen hydraulische binding meer is tussen het grout en de bodemwarmtewisselaar en tussen het grout en de boorwand.

Cementgebaseerde grouts hebben geen duurzame fysische en thermische hechting met het plastic leidingmateriaal ten nadele van een goede thermische geleidbaarheid en permeabiliteit

Omwille van bovenstaande redenen worden cement-grouts gemodificeerd met volgende ingrediënten:

- zand en/of andere toeslagstoffen zoals fillers om de thermische geleidbaarheid te bevorderen
- hulpstoffen zoals plastificeerders en vertragers
- bentoniet

4.3.6.4 Bentoniet/zand/cement mengsels

Bentoniet en zand zijn gebruikelijke toeslagstoffen om van pure cementslurries de schuifweerstand te verhogen en de densiteit te verlagen.

Aanbevolen gewichtsverhoudingen zijn:

- Betoniet: 10% à 25%
- Cement: 10%
- Zand: 25% à 30%
- Water: 40% à 50%

4.3.6.5 Overzichtstabel vulmateriaal

	Thermische geleidbaarheid (W/m.K)	Permeabiliteit (m/sec)	Aandachtspunten
Pure bentoniet	0.64 - 0.74	$< 10^{-9}$	• Maximale hardheid water: 500 ppm • Maximum chloridegehalte water: 1500 ppm • Niet aangeraden bij onverzadigde grond
Bentoniet/zand mengsels	1.20-1.50	$< 10^{-9}$	• Gebruik van grof zand minimaliseren • Gebruik van zeer fijn zand minimaliseren • Hoeveelheid water bewaken
Pure cement grouts	0.80-0.90	$10^{-8} - 10^{-5}$	• Niet aangeraden bij poreuze grond • Minder goede binding met warmtewisselaar
Bentoniet/zand grout	1.20 – 2.70	$< 10^{-9}$	• Thermische geleidbaarheid is afhankelijk van type zand • Hoe meer zand, hoe moeilijker de verpompbaarheid
Bentoniet/zand/ cement grout	1.50 – 2.00	$< 10^{-9}$	• Bentoniet: 10% à 25% • Cement: 10% • Zand: 25% à 30% • Water: 40% à 50%

4.3.7 Aanbrengen van vulmateriaal

4.3.7.1 Dosereren en mixen

Het grout wordt aangemaakt volgens vooraf vastgelegde en beproefde recepten.

De doseer-, meng- en pomptijd moeten zodanig op elkaar worden afgestemd dat het stortproces continu kan verlopen.

4.3.7.2 Aanbrengen van vulmateriaal

Het vullen van het boorgat dient te gebeuren met een injectiepijp onder overdruk. Het grout wordt door de injectiepijp gepompt naar de bodem van het boorgat. Tijdens het grouten wordt de injectiepijp langzaam naar boven gehaald, er voor zorgend dat gedurende het volledige proces de mond van de injectiepijp onder het storniveau blijft.

Bij zeer diepe boorgaten kan het terugtrekken van de injectiepijp moeilijk verlopen. In dit geval worden er twee pijpen aangebracht. Eén pijp wordt aan de onderzijde van de bodemwarmtewisselaar bevestigd en zal ook later in het boorgat achterblijven. Na de stortfase blijft deze injectiepijp blijvend gevuld met grout. Halverwege het boorgat wordt een tweede pijp voorzien die tijdens de stortfase wel wordt teruggetrokken.

Het groutproces is afgelopen als het product dat uit het boorgat stroomt de vereiste groutkwaliteit heeft.

4.3.7.3 Nazorg

Eén dag na het aanbrengen van het grout wordt gecontroleerd in hoeverre het materiaal is ingezakt. Indien noodzakelijk wordt extra grout aangebracht.

Tijdens de wintermaanden worden de wisselaars deels leeggemaakt tot ongeveer 2 meter onder het maaiveld.

De wisselaars worden dan terug afgedicht met kapjes die op hun beurt met kleefband worden omhuld.

4.3.8 Achterlaten boorlocatie en verslaggeving

Het boorbedrijf verwerkt bij de uitvoering van mechanische boring(en) vrijkomende grond, grondwater, werkwater, waswater en afvalmaterialen die de boorlocatie kunnen verontreinigen, op een zodanige wijze dat deze materialen de boorlocatie niet verontreinigen:

Alle vrijkomende grond, grondwater, werkwater, waswater en afvalmaterialen, die de boorlocatie kunnen verontreinigen, worden afgevoerd naar daartoe erkende verwerkers;

De boorder verzorgt de rapportering aan de overheid zoals wettelijk is vastgelegd. Deze rapportering omhelst niet enkel de beschrijving van bodem maar ook de maatregelen die getroffen zijn om verontreiniging tegen te gaan inclusief een attest van het gebruikte grout.

4.4 Aanleg horizontaal netwerk

De horizontale transport- en verbindingleidingen verbinden de verticale bodemwarmtewisselaars met de warmtepomp in het gebouw.

4.4.1 Eisen

Het materiaal voor de horizontale leidingen voldoet aan dezelfde eisen als deze voor de bodemwarmtewisselaar.

Bij voorkeur wordt hetzelfde materiaal aangewend voor het hydraulisch netwerk als voor de bodemwarmtewisselaars.

4.4.2 Aanleg horizontaal netwerk

De horizontale transport- en verbindingleidingen verbinden de verticale bodemwarmtewisselaars met de warmtepomp in het gebouw.

4.4.2.1 Leidingen

Voor plaatsing wordt een visuele controle gedaan op eventuele beschadigingen.

4.4.2.2 Plaats en diepte

algemeen

De leidingen moeten op een diepte worden gelegd zodat ze voldoende beschermd worden tegen beschadigingen ten gevolge van bijvoorbeeld graafwerken.

Hoe kleiner de aanzetdiepte, hoe groter bovendien de invloed van de buitentemperatuur is. Zeker bij grote of verder afgelegen boorvelden met een uitgestrekt horizontaal netwerk, is dit een aandachtspunt.

Het is daarom aangewezen om de leidingen op een minimum diepte van 80cm te plaatsen. Op deze wijze worden ook de leidingen beschermd waarbij geen antivries in het fluïdum wordt gebruikt.

De heen- en retourleidingen bevinden zich in één sleuf op een minimale afstand van 20cm.

De minimale bochten zijn afhankelijk van het materiaal (PE100 vs PE-XA), de diameter van de buis en de temperatuur van het materiaal.

Tabel 8: minimale straal

	PE-XA leidingen		PE leidingen
--	-----------------	--	--------------

Minimale straal	20x2.0	25x2.3	32x3.0	40x3.7	20x2.0	25x2.3	32x3.0	40x3.7
20°C	20cm	25cm	30cm	40cm	40cm	50cm	65cm	80cm
10°C	30cm	40cm	50cm	65cm	70cm	85cm	110cm	140cm
0°C	40cm	50cm	65cm	80cm	100cm	125cm	160cm	200cm

Het is belangrijk dat de ingegraven leidingen niet onderworpen worden aan puntbelastingen ten gevolge van de aanwezigheid van stenen e.d. rond de leidingen. Dit kan vermeden worden door de leidingen te plaatsen op bijvoorbeeld een zandbed van minimaal 15 cm. Over de leidingen wordt terug een laag zand aangebracht van 30 cm voordat er verder wordt aangevuld met geschikt materiaal. Dit materiaal wordt voldoende verdicht in functie van het latere gebruik van het terrein. Het aanvullen mag pas worden uitgevoerd na een positieve druktest.

Het tracé en de diepte van de leidingen worden zorgvuldig in kaart gebracht.

Er dient een ontluuchtingspunt te worden voorzien op het hoogste punt.

Leidingen in sleuven

Indien de leidingen in uitgegraven sleuven worden geplaatst, dienen deze sleuven voldoende breed, diep en vrij van water te zijn. De wanden van de sleuven moeten voldoende stabiel zijn.

De leidingen worden geplaatst overeenkomstig de CEN/TR 1046: Thermoplastics piping and ducting systems : systems outside building structures for the conveyance of water or sewage : practices for underground installation (Systèmes de canalisations et de gaines en matières thermoplastiques - Systèmes d'adduction d'eau ou d'assainissement à l'extérieur de la structure des bâtiments -Pratiques pour la pose en enterré

Tabel 9 Breedte van de sleuf in functie van de diepte, bron CEN/TR 1046, p. 19

Tableau 5 — Largeur de tranchée minimale en fonction de la profondeur de tranchée

Profondeur de tranchée m	Largeur de tranchée minimale M
< 1,00	aucune largeur minimale exigée
$\geq 1,00 \leq 1,75$	0,80
$> 1,75 \leq 4,00$	0,90
$> 4,00$	1,00



Figuur 63: uitvoering sleuf, bron Verheyden



Figuur 64: bron duratherm

Boorveld onder een gebouw

Indien het boorveld geheel of gedeeltelijk onder een gebouw, kunnen er speciale maatregelen worden voorgeschreven in functie van de latere werkzaamheden. Het is aan te bevelen om boven de leidingen een zandbed te voorzien van 50cm.

Testen zie verder ?

Het is niet aan te bevelen om de horizontale leidingen te integreren in een zuiverheidslaag van beton of in de betonnen vloer. Differentiële zettingen in deze constructiedelen kunnen spanningen en schade veroorzaken in het leidingnetwerk.

4.4.3 Uitvoering collectoren

Collectoren kunnen zowel binnen als buiten het gebouw zijn gelegen.



Figuur 65: collector in collectorput, bron GHSP



Figuur 66: collector in gebouw, bron Smet

Afhankelijk van de grootte en buitenomstandigheden kunnen collectorputten uitgevoerd worden in metselwerk, beton of kunststof, al dan niet geprefabriceerd.

Kunststofcollectorputten die niet in een verkeerszone liggen, moeten voldoen aan NBN EN 13598-1: 'Kunststofleidingssystemen voor drukloze ondergrondse rioleringen - Ongeplasticeerd PVC (PVC-U), polypropyleen (PP) en polyethyleen (PE) - Deel 1: Specificaties voor aanvullende hulpstukken, inclusief inspectieputten'

Kunststofcollectorputten die in een verkeerszone worden voorzien, moeten voldoen aan NBN EN 13598-2: Kunststofleidingssystemen voor drukloze ondergrondse rioleringen - Ongeplasticeerd PVC (PVC-U), polypropyleen (PP) en polyethyleen (PE) - Deel 2: Specificaties voor mangaten en inspectieputten in verkeerszones en in diep ingegraven installaties

Betonnen collectorputten moeten voldoen aan NBN EN 1917 en NBN EN B21-101 - Toegangs- en verbindingsputten van ongewapend beton, van staalvezelbeton en van gewapend beton.

Betonnen toezichtputten die toegankelijk moeten blijven voor personen, moeten voldoen aan NBN EN 476: 'Algemene eisen voor onderdelen gebruikt in binnen- en buitenrioleringen onder vrij verval'

De collectorput en de aansluitingen doorheen de wand van de collector worden waterdicht uitgevoerd. De collectorput wordt zodanig uitgevoerd dat hij niet omhoog gedrukt wordt bij verhoging van de grondwatertafel. De opwaartse beweging van de collector zou immers spanningen op de aanvoer- en afleidingen kunnen veroorzaken.

Grote collectorputten kunnen met een drainerende bodem worden uitgevoerd. De collector en het bijhorend kraanwerk wordt boven het grondwaterniveau gepositioneerd.

4.4.4 Horizontale verbindingen

a. Algemene eisen

Verbindingen in de horizontale delen worden zoveel mogelijk vermeden.

De verbindingen van de kunststofbuizen (buizen onderling, buizen met collectoren,...) moeten volkomen en blijvend dicht zijn. De materialen van de koppelingen in de grond moeten bestand zijn tegen corrosie.

De treksterkte van de verbinding moet ten minste even groot zijn als deze van de buis.

De dichtheidstest en de drukproef moeten de degelijkheid van de las kunnen aantonen (zie verder § **Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.** en § **Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.**

De verbindingstechnieken worden uitgebreid behandeld in Technische Voorlichting “Kunststofbuissystemen voor de distributie van warm en koud water onder druk in gebouwen.”

Volgende normen zijn van toepassing voor lasverbindingen:

- NBN T 42-010 Buizen van polyethyleen en van andere polyolefinen - Richtlijnen voor het uitvoeren van lasverbindingen
- NBN T 42-011 Polyethyleen leidingssystemen - Richtlijnen voor de opleiding, kwalificatie en herkeuring van lassers voor stuik, mof- en elektrolassen
- ISO 12176-reeks: Plastics pipes and fittings -- Equipment for fusion jointing polyethylene systems

b. Lasverbindingen

Bij lasverbindingen worden de twee te verbinden stukken verhit vooraleer ze met elkaar in contact worden gebracht. De lastemperaturen en –drukken waarbij dit gebeurt zijn afhankelijk van het materiaal en het soort verbinding.

Voor lastechnieken moet men steeds twee stukken van hetzelfde materiaal gebruiken. Bovendien is het ten zeerste aangeraden om materialen van dezelfde fabrikant aan elkaar te lassen.

• Stuiklassen

Stuiklassen wordt gebruikt voor de verbinding van buizen en hulpstukken zonder ze in elkaar te schuiven. Het vereist een geschikte machine om de stukken vast te houden en te leiden tijdens het verhitten, in contact brengen en afkoelen.

Voor de kwaliteit van de verbinding is het van het grootste belang dat de te lassen oppervlakken en het lasgereedschap perfect schoon zijn.

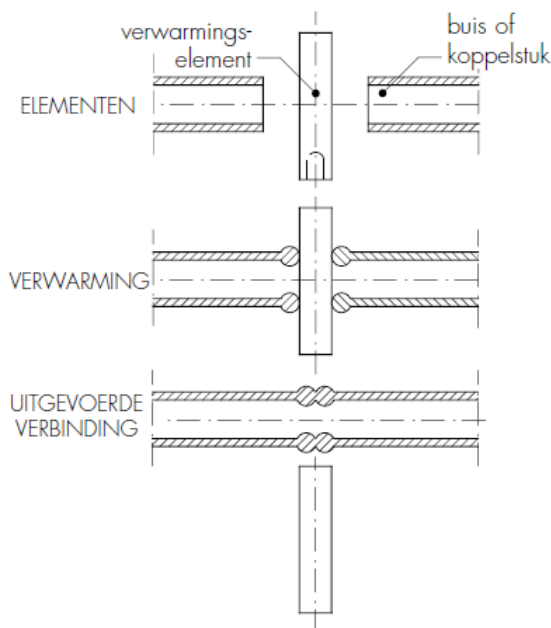
Bij het stuiklassen met een verwarmingselement worden de te verbinden stukken (buis of koppelstuk) in de laszone tot de gewenste temperatuur verwarmd, en vervolgens aan elkaar

gelast door een druk uit te oefenen en zonder toevoeging van een ander materiaal, om een homogene verbinding te verkrijgen. (Figuur 67: stuiklassen met een verwarmingselement, bron TV 207)

Dit soort lassen mag enkel worden uitgevoerd met lasapparatuur waarmee de grootte van de uitgeoefende druk kan worden gecontroleerd.

Ter plaatse van de naden moet de wanddikte van de te lassen stukken gelijk zijn

Stuiklassen met een verwarmingselement wordt uitsluitend door geschoold personeel uitgevoerd.



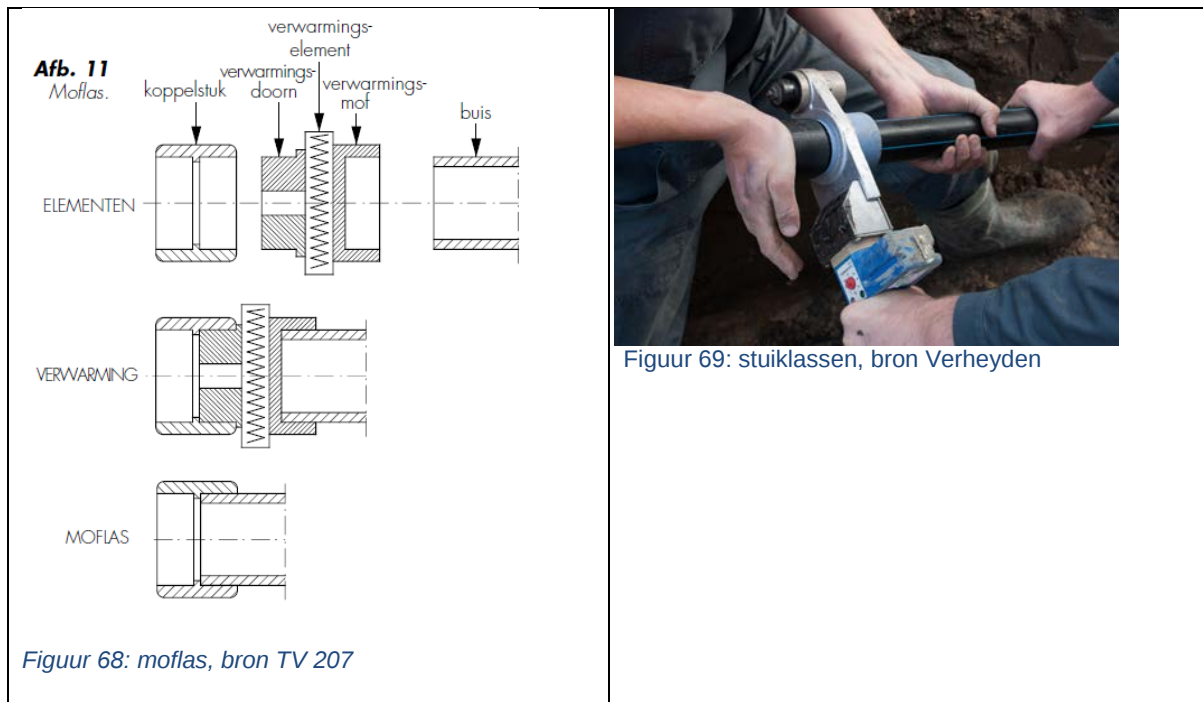
Figuur 67: stuiklassen met een verwarmingselement, bron TV 207

Buizen en onderdelen moeten tijdens de opslag beschermd worden tegen zonnestraling en de lasopstelling tegen ongunstige weersomstandigheden, zoals regen, sneeuw of wind. Bij temperaturen onder 5 °C en boven 45 °C dienen de nodige maatregelen te worden genomen om een temperatuur te bekomen die een onberispelijke uitvoering onder normale arbeidsvoorwaarden mogelijk maakt.

- **Moflassen**

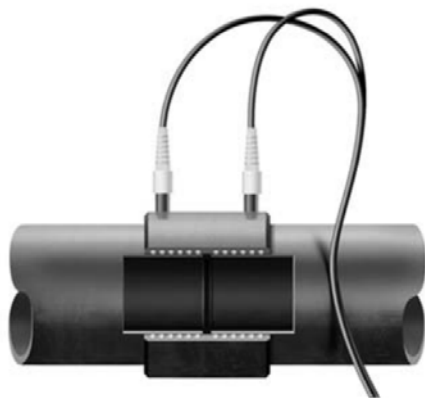
Zoals bij het stuiklassen is het van het primordiaal belang dat de laselementen perfect zuiver zijn.

Het buitenoppervlak van het buiseind en het binnenoppervlak van de mof van het koppelstuk worden eerst op lastemperatuur gebracht door het verwarmingselement dat voorzien is van een verwarmingsdoorn en -mof. Daarna worden de buis en de mof in mekaar gebracht en wordt de lasverbinding verwezenlijkt. (Figuur 68: moflas)



- **Elektrolassen**

Voor elektrolassen gebruikt men koppelstukken die uitgevoerd zijn in hetzelfde materiaal als de gebruikte buizen. Ze zijn voorzien van een elektrische weerstand die over hun binnenoppervlak loopt voor het verhitten en smelten van de binnenzijde van het koppelstuk en van de buitenzijde van de buis waarop het koppelstuk wordt bevestigd. De koppelstukken, de buizen en de lastoestellen (§ 4.3.4.1) moeten van verenigbare handelsmerken zijn.



Figuur 70: elektrolassen

c. Mechanische verbinding: de knelkoppeling

De niet-demonteerbare mechanische koppelingen voor kunststofbuizen bestaan uit een steunhuls die dient om de buis inwendig te verstijven tegen de externe radiale druk die door een spanning wordt uitgeoefend. De druk wordt verzekerd door een kunststofmof te gebruiken

, die eerst over de buis geschoven wordt en gelijktijdig met de buis verwijld wordt om het geheel op de steunhuls te kunnen schuiven.

Ten gevolge van de neiging van de kunststof om zijn oorspronkelijke vorm terug aan te nemen, wordt een radiale druk op de insert uitgeoefend die de mechanische sterkte en dichtheid van de verbinding verzekert. Dergelijke verbinding is niet voor alle soorten kunststoffen geschikt en kan enkel worden gebruikt in het kader van een volledig systeem waarbij buis en koppelstuk dienovereenkomstig gedimensioneerd zijn



Figuur 71: schuifhulzen, bron Rehau

d. Overzicht

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de mogelijke verbindingstechnieken en de toepasselijke normen in functie van het gebruikte materiaal.

PE	PE-XA	
EN 12201-3	EN ISO 15875-3	mogelijke verbindingstechnieken
X	X	elektrolasverbinding
X		Stuiklas of spiegelllasverbinding
X		moflasverbinding
	X	knelkoppeling

Tabel 10: overzicht gebruikte technieken

Onderstaande tabel geeft de verbindingstechnieken weer die kunnen gebruikt worden tussen de buis en een vormstuk

Buis	vormstuk	verbindingstechniek
PE100 PE100-RC	PE100	Stuiklas, elektrolas, mofverbinding
PE100 PE100-RC	PE-RT	Stuiklas, elektrolas, mofverbinding
PE-RT	PE100 PE-RT	Stuiklas, elektrolas, mofverbinding
PE-XA	PE100	Elektrolas

Tabel 11: verbindingstechnieken tussen buis en hulpstukken, bron: KRV

Voor leidingen met een diameter kleiner of gelijk aan 50mm, is het raadzaam om de elektrolas te gebruiken. De elektrolas heeft het voordeel uitgevoerd te kunnen worden bij een omgevingstemperatuur van -10°C tot 45°C. Vermits de lastijd afhankelijk is van de temperatuur, is het belangrijk dat alle te lassen onderdelen op dezelfde temperatuur zijn. Deze lassen worden bij voorkeur uitgevoerd door gecertificeerde lassers.

De buizen worden doorgaans met de collector verbonden met steekmofverbindingen (insteekkoppeling).

4.4.5 Verbindingen met de verticale wisselaars

De sleuf wordt ter plaatse van de verticale bodemwarmtewisselaar verdiept zodat de verbinding zelf op voldoende diepte kan worden aangebracht. De kop van de bodemwarmtewisselaar mag niet hoger dan de horizontale leidingen liggen.

De verticale bodemwarmtewisselaars kunnen rechtstreeks worden aangesloten op de horizontale leidingen indien de vereiste minimale buigradius het toelaat.

De U-lus van de verticale wisselaar kan ook met behulp van een T-stuk of knie op de horizontale leiding worden aangesloten



Figuur 72: elektrolasmoffen, bron Rehau

Alle leidingen die zich niet in een vorstvrije diepte bevinden, moeten worden geïsoleerd

4.4.6 Muurdoorvoer

Eisen

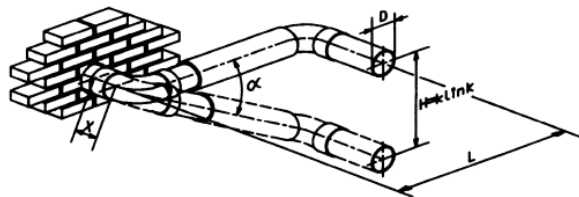
Alle leidingen die zich niet in een vorstvrije diepte bevinden, moeten worden geïsoleerd.

De doorvoer van het horizontaal netwerk naar de technische ruimte van het gebouw waar de warmtepomp is geïnstalleerd, moet waterdicht en dampdicht worden uitgevoerd. De eisen met betrekking tot de waterdichtheid worden bepaald door de grondwaterdruk. Deze druk wordt bepaald door de diepte van de doorvoer t.o.v. de hoogst mogelijk grondwaterstand.

Zettingen

Om eventuele beschadigingen ten gevolge van zettingsverschillen tussen binnen- en buitenzijde van het gebouw te voorkomen, dienen de nodige maatregelen te worden genomen.

Kleine zettingen kunnen worden opgevangen door de elasticiteit van het vulmateriaal ter plaatse van de muurdoorvoer. Als er grotere zettingen worden verwacht, worden de leidingen aan de buitenzijde van de muur in een S-bocht gelegd.



Aantal doorvoeren

Het aantal doorvoeren kan worden beperkt tot twee indien de collector aan de buitenzijde van het gebouw wordt geplaatst. Enkel de heen- en retourleiding tussen de collector en de warmtepomp moeten doorheen de muur worden geleid.

Bij kleinere installaties is het gebruik van een Tichelmannleiding waarop verschillende bodemwarmtewisselaars worden aangesloten in deze context ook een voordeel.

Voorzien van doorvoergaten

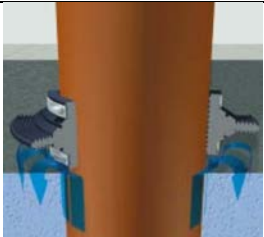
De doorvoergaten waardoor in latere fase de leidingen naar binnen het gebouw worden gebracht, kunnen reeds voorzien zijn tijdens de ruwbouwfase of worden later aangebracht door boringen in de muur.

Vooraf aangebrachte wachtopeningen

Indien vooraf de exacte locatie van de doorvoer gekend is, is het aangewezen om de nodige wachtbuizen in de ruwbouwfase aan te brengen. Deze wachtbuizen worden mee ingestort of ingemetst.

Indien de collector aan de binnenzijde van het gebouw wordt voorzien, moeten meerdere leidingen doorheen de muur moeten worden voorzien. Om het geheel water- en dampdicht uit te voeren wordt een volledige plaat met doorvoerleidingen in de muur ingestort

Een wachtbuis voorzien van een kraag

	 <i>Figuur 73: breedte van de sleuf in functie van de diepte, bron CEN/TR 1046, p. 19</i>
 <i>Figuur 74: muurdoorvoer met kraag, bron Emergo</i>	 <i>Figuur 75: muurdoorvoer, bron Aplro Vught</i>
 <i>Figuur 76: plaatvormig muurdoorvoerstuk, bron alpovrugt</i>	
Wachtbuizen met kraag	

Een wachtbuis zonder kraag.

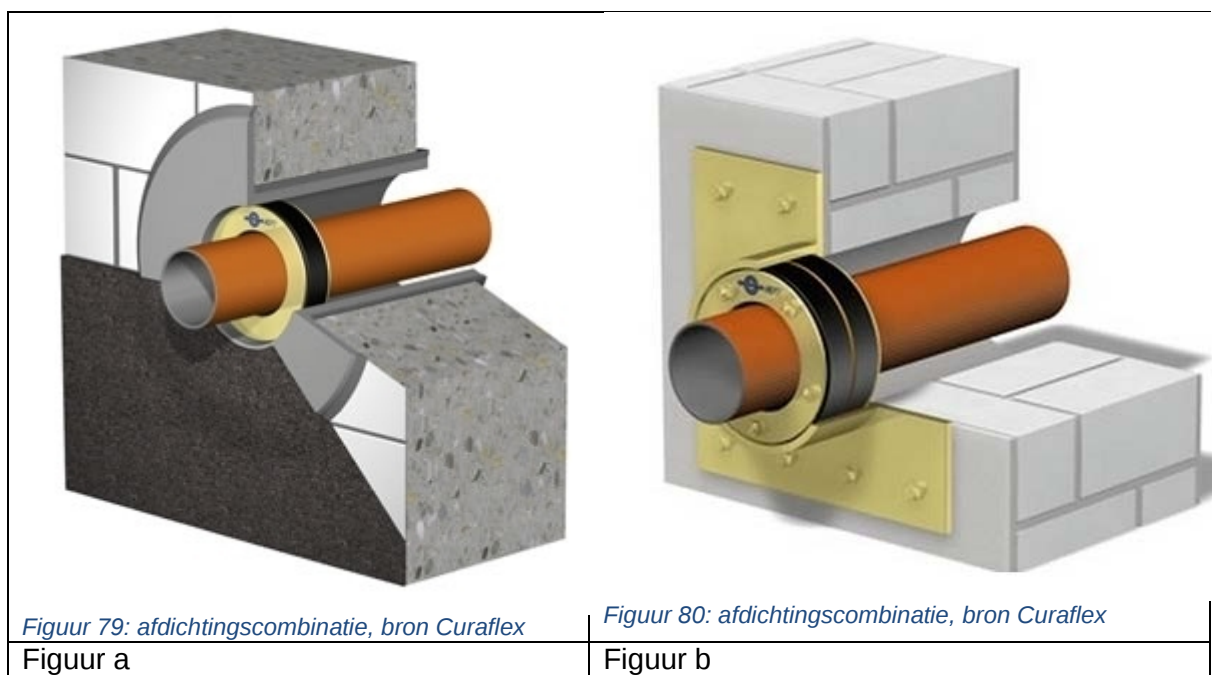
Deze wachtbuizen hebben een ruwe vezelig of gegroefde buitenzijde om de verbinding met het beton te verbeteren. De binnenzijde van de wachtbuis is glad.



achteraf aangebrachte openingen

Bij kernboringen in een betonmuur kunnen afdichting worden voorzien tussen het de binnenkomende buizen en het boorgat..

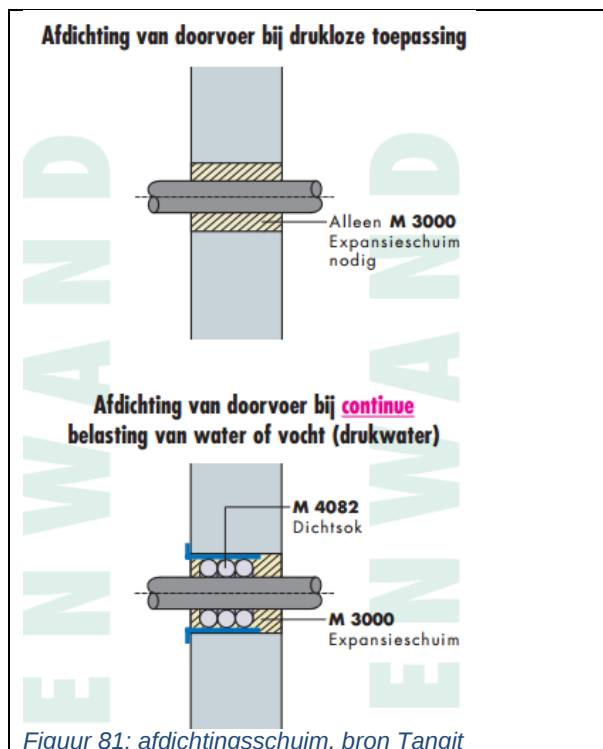
Bij boringen doorheen metselwerk wanden wordt nadien een gladde mantel met kraag aangebracht (figuur a) of een extern hulpstuk met een kraag (figuur b)



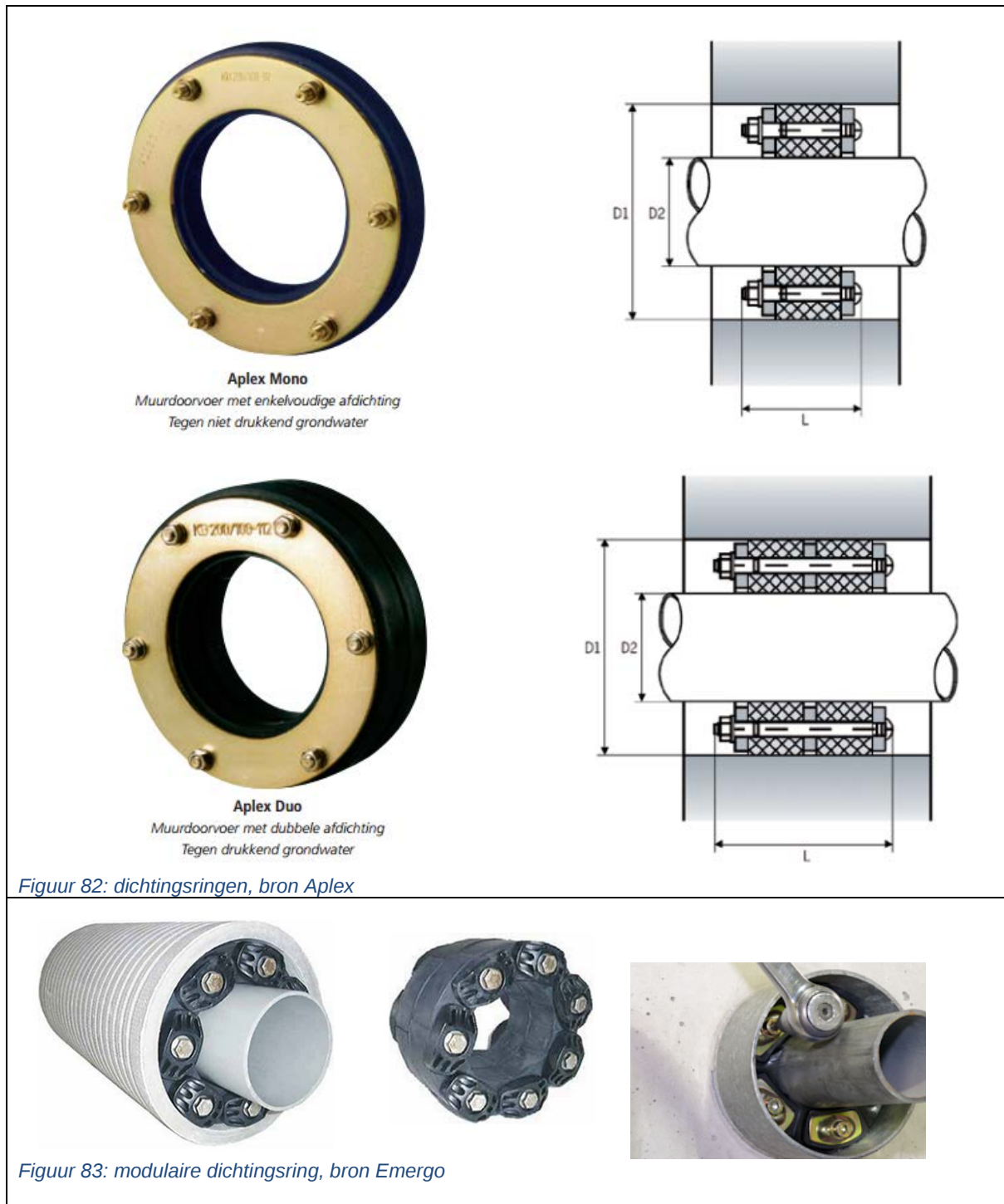
Afdichtingen

De afdichting tussen de binnenkomende leiding en de wachtbuis kan op verschillende wijzen gebeuren. De gebruikte methode moet overeenstemmen met de verwachte waterdruk. De door de leverancier opgegeven maximale druk moet groter zijn dan de verwachte optredende waterdruk.

expansieschuim

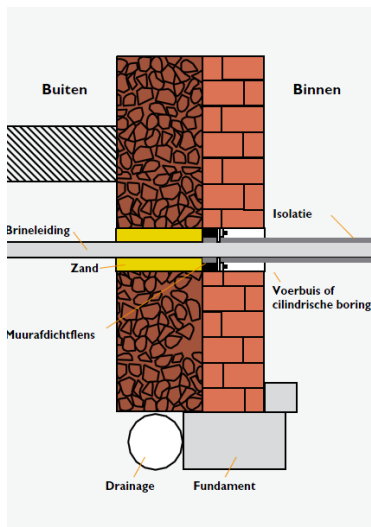


speciale rubberen afdichtingen.



Isoleren van de leidingen

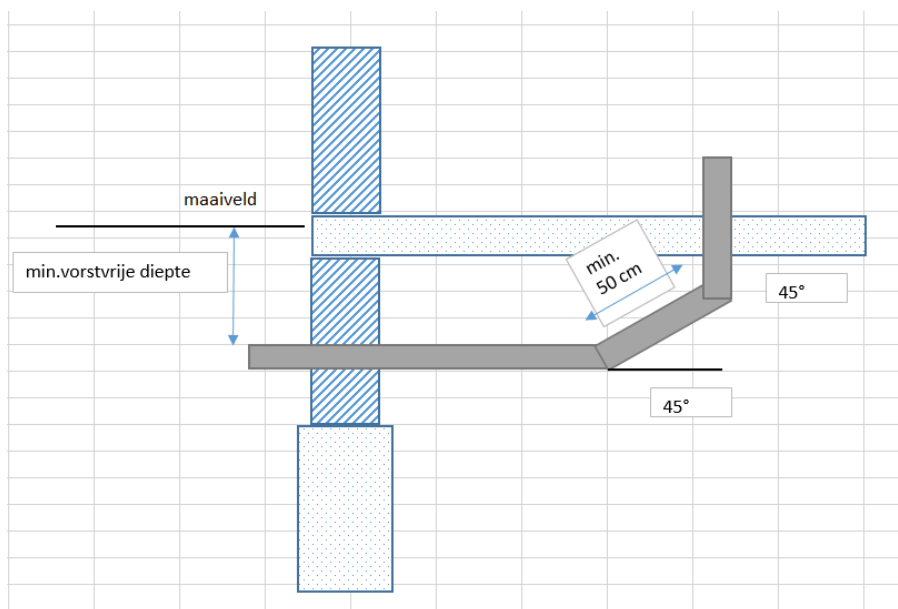
Om condensvorming ter hoogte van de muur te voorkomen, wordt de afdichting zo kort mogelijk naar de buitenmuur geplaatst. De leiding zelf wordt geïsoleerd waarbij de isolatie zuurstofdiffusiedicht verlijmd wordt tegen het stootvlak van de afdichtingsflens



Figuur 84: doorvoer en isolatie van de leiding, bron tekening Alpha-InnoTec

Niet-ondergrondse technische ruimte

Indien de technische ruimte zich boven het maaiveld bevindt, wordt er een wachtbuis voorzien waarin later de binnenkomende leidingen worden aangebracht. De diameter van de wachtbuis is in functie van het aantal binnenkomende leidingen en is minimum 110mm. Er wordt gebruik gemaakt van bochten van 45°.



Figuur 85: wachtbuis voor bovengrondse technische ruimte

4.5 Indienstelling van het bodemenergiesysteem

4.5.1 Spoelen en ontluchten

Na het aansluiten van de bodemwarmtewisselaars op de horizontale leidingen en de collector, maar voor dat het systeem in bedrijf wordt gesteld, moet het geheel worden gespoeld en ontlucht. Nadien volgen een aantal testen om de montage en de werking te controleren.

Voor grotere bodemenergiesystemen wordt circuit per circuit getest. Voor kleinere installaties wordt het geheel getest.

Om zorg te dragen dat het systeem vrij is van onzuiverheden dient het minimaal eenmaal volledig te worden doorspoeld.

De spoeltijd is afhankelijk van het debiet en de totale lengte van het circuit. De totale lengte bestaat dus uit de som van alle bodemwarmtewisselaars en de lengte van het horizontale netwerk.

Het gekozen debiet moet hierbij voldoende groot zijn om de meest voorkomende deeltjes uit te spoelen. Hiervoor worden volgende minimum debieten aangehouden ⁴

Diameter bodemwarmtewisselaar (mm)	Debiet (m ³ /u)	Debiet (l/min)
25	1.0	16
32	1.8	30
40	2.5	42

De spoeeenheid moet in staat zijn om in elk onderdeel van de installatie een minimum stroomsnelheid van 0.61 m/sec te bereiken ⁵

De spoeltijd per bodemlus kan worden bepaald aan de hand van de grafiek in bijlage 7.10: Minimum spoeltijd per bodemwisselaar

Leidingwater wordt op de vertrekcollector gepompt. Het water spoelt door het circuit en wordt aan de retourcollector opgevangen. Door de stromingsrichting regelmatig om te draaien, wordt het circuit ontlucht. Afhankelijk van de grootte van het circuit, kan het nodig zijn om de ontluchting na enige tijd te herhalen.

De circuits worden één voor één afzonderlijk gespoeld en ontlucht.

⁴ ISSO publicatie 73: 4.4-1

⁵ (GHSP Association, 2011)

4.5.2 Flowtest

Om na te gaan of het systeem geen verhoogde drukval of hydraulische weerstand heeft, wordt aan een constant debiet het drukverschil tussen de in- en uitstroom gemeten.

Het gemeten drukverschil wordt vergeleken met de maximaal berekende drukval. Het verschil tussen de gemeten en berekende waarde bedraagt maximaal 15%.

Zie ook bijlage 7.11 Maximum toegelaten drukval

Deze flowtest mag gecombineerd worden met het spoelen en ontluichten van het circuit.

4.5.3 Dichtheidstest (druktest op lage druk)

De dichtheidsbeproeving wordt uitgevoerd op elke individuele parallelle set wisselaars, inclusief horizontale leidingen. De dichtheidsbeproeving wordt als volgt uitgevoerd:

- 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 (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.

Deze testen worden uitgevoerd voordat de sleuven terug gevuld zijn.

4.5.4 Drukproef (sterktetest)

Deze druktest mag slechts gebeuren nadat de sleuven zijn gevuld en verdicht.

Het met water gevulde systeem wordt op een druk van 1.5x de maximum bedrijfsdruk gebracht de druk mag na 1 uur niet meer dan 10% gedaald zijn.

Voor een volledige beschrijving van de testprocedure: zie bijlage 7.12 Testprocedure drukproef

4.5.5 Afvullen van het systeem met het voorgeschreven circulatiemengsel

De samenstelling van het circulatiemedium wordt voorgeschreven door de ontwerper.

Als de flowtesten en druktesten zijn uitgevoerd en het bestaan van lekken is uitgesloten, wordt het systeem wordt met het voorgeschreven circulatiemengsel afgevuld

De componenten worden in een mengvat gemengd en in het systeem geïntroduceerd of het geïnhibeerde glycol wordt aan de bodemwarmtewisselaar toegevoerd terwijl gecirculeerd

wordt (over een mengvat). Bijvullen van het met water gevulde wisselaarsysteem voldoet niet omdat er niet snel genoeg voldoende menging optreedt.

Overschotten of overloop van het mengsel moet conform de milieuregelgeving worden opgevangen en afgevoerd.

4.5.6 Afregelen en ingebruikname

Er zijn twee elementen die moeten afgeregeld worden: de pomp en de debietsverdeling over de verschillende circuits van het boorveld.

De pomp

Het pompdebiet dient zodanig ingesteld te worden dat het berekende ontwerpdebiet geleverd wordt. Dit kan ofwel gebeuren door het toerental aan te passen (vast of traploos), ofwel door de opvoerhoogte te wijzigen door de persleiding van de pomp te voorzien van een inregelventiel, ofwel door een combinatie van beide ingrepen. De afregeling wordt besproken in het WTCB-Rapport 14, Ontwerp en dimensionering van centrale-verwarmingsinstallaties met warm water.

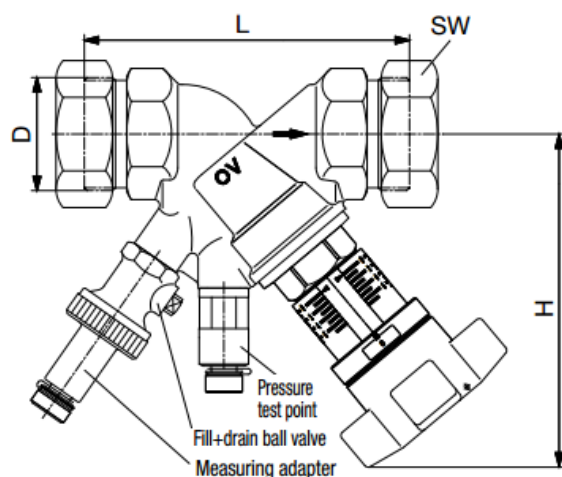
De verschillende circuits van het boorveld

Het is belangrijk dat het alle bodemwarmtewisselaars met eenzelfde debiet doorstroomd worden. Daarvoor kan het noodzakelijk zijn om de verschillende circuits af te regelen.

Systemen met Tichelmanaansluitingen of centrale aansluitingen waarvan het verschil in totale lengte inclusief de heen- en retourleiding per bodemwarmtewisselaar kleiner is dan 10% moeten niet worden afgeregeld.

De andere systemen moeten voorzien worden van drukregelventielen aan elk circuit om het debiet af te regelen.

De drukval van over alle circuits wordt gemeten aan het betreffende drukregelventiel. Het circuit met de grootste drukval dient als referentie. De andere circuits worden zodanig ingeregeld dat hun drukverlies gelijk wordt aan de referentie.



Figuur 86; drukkregelventiel

4.5.7 Opleveringsdocumenten

Volgende documenten maken deel uit van de oplevering:

- Het boorverslag
- Het attest van het gebruikte grout (indien van toepassing)
- Certificaten van de bodemwarmtewisselaars en de hulpstukken
- Verslagen van de druktest en de drukval door de flowtest
- Een plan met de exacte locatie van de bodemwarmtewisselaars, de collectoren en de horizontale leidingen
- Samenstelling van het dragermedium

4.6 Nazorg

4.6.1 Monitoring en periodieke controles

De druk in de leidingen wordt automatisch gemonitord. Bij drukverlies moet het systeem automatisch uitvallen. Als het drukverlies het gevolg is van een lek in een lus, wordt de lus in kwestie buiten dienst gesteld.⁶

Direct na installatie en vervolgens tweejaarlijks worden de volgende controles uitgevoerd, telkens een controle gedurende het stookseizoen.

- De mate van vorstbescherming van het fluïdum dient te worden gemeten en de bacteriologische kwaliteit en helderheid dienen tenminste zintuigelijk te worden vastgesteld. Wanneer de bacteriologische kwaliteit van het mengsel niet voldoet, dient de gehele inhoud te worden vervangen, nadat het systeem eerst is gereinigd.
- Wanneer het systeem is bijgevuld worden na vier weken de druk in het systeem en de temperaturen in de aanvoer- en retourleiding nogmaals gecontroleerd.
- Enig vermoeden van lekkages van antivries in het bodemsysteem dient te worden gemeld aan de bevoegde instantie
- Meet en registreer de druk van het systeem

⁶ VLAREM II, Artikel 5.55.2.8. § 1.

- Door te lage temperatuurtoepassing, is het glycol weinig tot niet onderhevig aan degradatie. Toch is het aan te bevelen om bij grote werkzaamheden zoals het bijvullen na lekkages of de vervanging van de warmtepomp, het antivriesgehalte van fluïdum te bepalen met een refractometer..
-

Noteer elke toevoeging van vloeistof (water of antivries): de hoeveelheid en de druk voor en na het toevoegen

4.6.2 Uitsluiting

Als een of meerdere bodemwarmtewisselaars buiten gebruik worden gesteld, wordt het fluïdum afgepompt en vervangen door water dat voldoet aan de milieukwaliteitsnormen voor grondwater.

De overheid dient zoals wettelijk bepaald hiervan op de hoogte worden gebracht.

5 Lijst van figuren

Figuur 1: algemeen principe van een warmtepompinstallatie, bron WTCB-Dossiers 2013/3.2	5
Figuur 2: Evolutie van de temperaturen onder het aardoppervlak; Bron: WTCB dossier 2013/3.2	6
Figuur 3: temperatuursverloop bij ondiepe geothermie.....	6
Figuur 4: bodemtemperatuurverloop bij thermisch onbalans	7
Figuur 5: bodemtemperatuurverloop bij thermische balans	8
Figuur 6: open systeem tijdens stookseizoen.....	9
Figuur 7: open systeem tijdens koelseizoen	9
Figuur 8: Horizontale bodemwarmtewisselaars	10
Figuur 9: U-vormige verticale warmtewisselaar	11
Figuur 10: verticale bodemwarmtewisselaars.....	11
Figuur 11: compartimentering van concentrische warmtewisselaars	12
Figuur 12: spiraalvormige wisselaars bron REHAU.....	13
Figuur 13: thermo-actieve heipalen, bron TNO rapport heipalen	14
Figuur 14: In de grond gevormde energiepaal, bron: WIGpalen	14
Figuur 15: thermo-actieve tunnelementen	15
Figuur 16: thermo-actieve diepwanden	15
Figuur 17: overzicht van de bodemenergiesystemen.....	16
Figuur 18: opbouw van een geothermische installatie	17
figuur 19: bivalente alternatieve modus.....	20
figuur 20: bivalente parallel modus.....	20
Figuur 21: flowchart ontwerpmethodiek.....	34
Figuur 22: belastingsduurcurve, Bron: Kwaliteitsrichtlijn Verticale Bodemwarmtewisselaars	37
Figuur 23: energiebehoefte verwarmen > koelen	38
Figuur 24: scenario 1a.....	38
Figuur 25: scenario 1b.....	38
Figuur 26: zonthermisch dak, zwembad de Nekker te Mechelen.....	39
Figuur 27: warmtewingever, bron Janssens de Jong Bouw	39
Figuur 28: wegencollectoren	40
Figuur 29: schema voor wegencollectoren	40
Figuur 30: collectoren in rioleringsbuizen om restwarmte te recupereren	41
Figuur 31: behoefte aan koelen > verwarmen	41
Figuur 32: scenario 2a.....	41
Figuur 33: scenario 1b.....	41
Figuur 34: TRT meetopstelling	43
Figuur 35: Voorbeeld van geschiktheidskaart voor Vlaanderen tot op een diepte van 100 m	44
Figuur 36: temperatuurverloop in bodem (herhaling)	46
Figuur 37: enkele lus	47
Figuur 38: dubbele lus.....	47
Figuur 39: verticale U-vormige bodemwarmtewisselaar	49

Figuur 40: voet van een bodemwarmtewisselaar, bron Rehau.....	53
Figuur 41: voet van een ononderbroken bodemwarmtewisselaar voorzien van een ballast. bron: Rehau	54
Figuur 42: doorsnede van een boorgat met bodemwarmtewisselaar	55
Figuur 43: functie van de afwerking van een boorgat.....	55
Figuur 44: configuraties van bodemwarmtewisselaars	56
Figuur 45: invloed van de thermische geleidbaarheid en de configuratie van de bodemwarmtewisselaar op de boorgatweerstand	57
Figuur 46: opstellingswijzen van boorvelden	59
Figuur 47, bodemregeneratie bij een open opstelling met grondwaterstroming	59
Figuur 48: collector.....	67
Figuur 49: Tichelmann aansluiting, bron handboek energiepalen.....	69
Figuur 50: centrale aansluiting, bron Verheyden of beter even hertekenen?	68
Figuur 51: seriekoppeling	70
Figuur 52: hydraulisch schema, bron Alpha –InnoTec, te hertekenen ?	66
Figuur 53: drukverliesdiagramma, bron Rehau	79
Figuur 54: drukval in bodemwarmtewisselaar, bron MIS 3005	80
Figuur 55: processtappen en kwaliteitscontroles bij de installatie van een bodemennergiesysteem	83
Figuur 56: schematisch principeschema spoelboren. Bron: VITO	87
Figuur 57: schematisch principeschema zuigboren. Bron VITO.....	89
Figuur 58: hamerboren, bron VLAREM	90
Figuur 59: elementen van de bodemwarmtewisselaar, bron: NF X10-970.....	92
Figuur 60: gewicht onderaan de bodemwisselaar, foto firma Energie Verbeke.....	92
Figuur 61: inbrengen van de bodemwarmtewisselaar, foto firma Energie Verbeke	94
Figuur 62: uitvoering sleuf, bron Verheyden	109
Figuur 63: bron duratherm	109
Figuur 64: collector in collectorput, bron GHSP	110
Figuur 65: collector in gebouw, bron Smet.....	110
Figuur 66: stuiklassen met een verwarmingselement, bron TV 207	112
Figuur 67: mofflas, bron TV 207	113
Figuur 68: stuiklassen, bron Verheyden	113
Figuur 69: elektrolassen	113
Figuur 70: schuifhulzen, bron Rehau	114
Figuur 71: elektrolasmoffen, bron Rehau	116
Figuur 72: breedte van de sleuf in functie van de diepte, bron CEN/TR 1046, p. 19	118
Figuur 73: muurdoorvoer met kraag, bron Emergo	118
Figuur 74: muurdoorvoer, bron Aplro Vught	118
Figuur 75: plaatvormig muurdoorvoerstuk, bron alpovrugt.....	118
Figuur 76: wachtbuis, bron Emergo	119
Figuur 77: wachtbuis, bron Emergo	119
Figuur 78: afdichtingscombinatie, bron Curaflex.....	119
Figuur 79: afdichtingscombinatie, bron Curaflex.....	119
Figuur 80: afdichtingsschuim, bron Tangit	120
Figuur 81: dichtingsringen, bron Aplex	121

Figuur 82: modulaire dichtingsring, bron Emergo	121
Figuur 83: doorvoer en isolatie van de leiding, bron tekening Alpha-InnoTec	122
Figuur 84: wachtbuis voor bovengrondse technische ruimte7.....	122
Figuur 85; drukregelventiel	126
Figuur 86. Testopstelling van een Thermische Respons Test (TRT) naar Sanner et al. (2000).....	137
Figuur 87. Fictief voorbeeld van de resultaten van een TRT.	141
Figuur 88. (a) Gemiddelde vloeistoftemperatuur, $T_f(t)$, in de bodemwarmtewisselaar in functie van de tijd (logaritmische schaal). Het resultaat van de lineaire interpolatie toegepast op de gegevens tussen $t = 10$ en $50u$ $\lambda(10,50)$ en $t = 20$ en $30u$ $\lambda(20,30)$ is geïllustreerd. (b) Verloop van $\lambda(10,t)$, $\lambda(20,t)$ en $\lambda(30,t)$ in functie van de tijd.	143
Figuur 89: avegaar	149
Figuur 90: luchthevelboren	150
Figuur 91: pulsboeren, bron VITO	152
Figuur 92: opgelegde temperatuurprofiel bij proef vorstbestandheid.....	158
Figuur 93: proefopstelling vorstbestandheid	159

6 Lijst van tabellen

Tabel 1: conventies voor de randvoorwaarden van warmteafgiftesystemen, bron WTCB-dossier Nr.4/2009.....	22
Tabel 2: warmteflux (W/m^2) bron EED.....	47
Tabel 3: temperatuur aardoppervlak ($^{\circ}C$) bron EED.....	47
Tabel 4: vereiste drukklassen voor courante diameters voor PE100-buizen volgens NBN EN 12201,.....	52
Tabel 5: reductiefactoren voor gebruik van PE100 bij temperaturen hoger dan $20^{\circ}C$	52
Tabel 6: richtwaarden voor minimale afstanden tot andere elementen.....	58
Tabel 7: medeigenschappen van monpropyleenglycol bij concentraties en temperaturen	61
Tabel 8: minimale straal	107
Tabel 9 Breedte van de sleuf in functie van de diepte, bron CEN/TR 1046, p. 19	108
Tabel 10: overzicht gebruikte technieken	115
Tabel 11: verbindingstechnieken tussen buis en hulpstukken, bron: KRV	115
Tabel 12: overzicht boortechnieken.....	154

7 Bijlagen

7.1 bepaling SPF volgens EPB

2. Als opwekkingstoestel in het project voor de ruimteverwarming

Het opwekkingsrendement van het warmtepompsysteem in de EPB-software wordt gerekend als de gemiddelde SPF (= seizoensprestatiefactor): $\eta_{\text{gen,heat}} = \text{SPF}$. De SPF is de gemiddelde prestatiecoëfficiënt van de warmtepomp, berekend over het ganse stookseizoen en in het specifieke gebouw, rekening houdend met het verbruik van bepaalde randapparatuur, zoals pompen in een captatienet.

De SPF wordt bepaald door de COP_{test} te vermenigvuldigen met enkele correctiefactoren.

$$\text{SPF} = f_{\theta} f_{\Delta\theta} f_{\text{pumps}} f_{\text{AHU}} \text{COP}_{\text{test}} \quad (-)$$

f_{θ} = een correctiefactor voor het verschil tussen de ontwerpvertrektemperatuur naar het systeem van warmteafgifte (of desgevallend warmteopslag) en de uitlaattemperatuur van de condensor in de test volgens NBN EN 14511, in geval van warmtetransport met water;

$f_{\Delta\theta}$ = een correctiefactor voor het verschil in temperatuursvariatie van enerzijds het warmteafgiftesysteem bij ontwerpomstandigheden (of desgevallend warmteopslag) en van anderzijds het water over de condensor onder testomstandigheden volgens NBN EN 14511, in geval van warmtetransport met water;

f_{pumps} = een correctiefactor voor het energieverbruik van een pomp op het circuit naar de verdamper;

f_{AHU} = een correctiefactor voor het verschil in luchtdebiet bij ontwerp en het luchtdebiet bij de test volgens NBN EN 14511. f_{AHU} komt enkel tussen bij de warmtepompen op ventilatielucht;

COP_{test} = de prestatiecoëfficiënt (coefficient of performance) van de warmtepomp volgens (de gepaste combinatie van) NBN EN 14511 en/of NBN EN 15879-1 onder de voorgeschreven testomstandigheden omschreven in bijlage A.

Er kan zo worden verrekend dat de projectomstandigheden verschillen van de testomstandigheden van de warmtepomp. Via de correctiefactoren kan er rekening worden gehouden met de dimensionering en de as-built-uitvoering van het warmtepompsysteem.

Standaard wordt in de EPB-software de COP_{test} omgerekend naar de SPF met de waarden bij ontstentenis van die correctiefactoren. Betere waarden kunnen worden berekend als bepaalde parameters worden ingevoerd in het project onder de rubriek 'Installaties', bij de subrubriek 'Verwarming en koeling'.

EPB:

<http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/epb/doc/invoerwarmtepompen.pdf>

7.2 Specifieke onttrekkingswaarden voor verticale bodemwarmtewisselaars

Bron: tabel A.3 EN 15450 = VDI 4640, deel 2, tabel 2:

Table 2. Possible specific extraction values for borehole heat exchangers

- only heat extraction (heating incl. hot water)
- length of the individual borehole heat exchangers must be between 40 and 100 m
- smallest distance between two borehole heat exchangers must be:
at least 5 m for borehole heat exchanger lengths of 40 to 50 m
at least 6 m for borehole heat exchanger lengths of > 50 m to 100 m
- double U-pipes with DN 20, DN 25 or DN 32
or coaxial probes with a minimum diameter of 60 mm are used as borehole heat exchangers
- not applicable to a larger number of small systems on a limited area

Underground	Specific heat extraction	
	for 1800 h	for 2400 h
<i>General guideline values:</i>		
Poor underground (dry sediment) ($\lambda < 1.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	25 W/m	20 W/m
Normal rocky underground and water saturated sediment ($\lambda < 1.5\text{--}3.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	60 W/m	50 W/m
Consolidated rock with high thermal conductivity ($\lambda > 3.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	84 W/m	70 W/m
<i>Individual rocks:</i>		
Gravel, sand, dry	< 25 W/m	< 20 W/m
Gravel, sand, saturated water	65–80 W/m	55–65 W/m
For strong groundwater flow in gravel and sand, for individual systems	80–100 W/m	80–100 W/m
Clay, loam, damp	35–50 W/m	30–40 W/m
Limestone (massif)	55–70 W/m	45–60 W/m
Sandstone	65–80 W/m	55–65 W/m
Siliceous magmatite (e.g. granite)	65–85 W/m	55–70 W/m
Basic magmatite (e.g. basalt)	40–65 W/m	35–55 W/m
Gneiss	70–85 W/m	60–70 W/m
The values can vary significantly due to rock fabric such as crevices, foliation, weathering, etc.		

7.3 Thermische bodemkarakteristieken

Bron VDI 4640, deel 1, tabel 1

	Type of rock		Thermal conductivity λ in W/(m·K)		Volume-related specific heat capacity $\rho \cdot c_p$ in MJ/(m³·K)	Density ρ in 10³ kg/m³
				recommended value		
Unconsolidated	clay/silt, dry		0,4–1,0	0,5	1,5–1,6	1,8–2,0
	clay/silt, water-saturated		1,1–3,1	1,8	2,0–2,8	2,0–2,2
	sand, dry		0,3–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	sand, moist		1,0–1,9	1,4	1,6–2,2	1,9–2,2
	sand, water-saturated		2,0–3,0	2,4	2,2–2,8	1,9–2,3
	gravel/stones, dry		0,4–0,9	0,4	1,3–1,6	1,8–2,2
	gravel/stones, water-saturated		1,6–2,5	1,8	2,2–2,6	1,9–2,3
	tilloam		1,1–2,9	2,4	1,5–2,5	1,8–2,3
	peat, soft lignite		0,2–0,7	0,4	0,5–3,8	0,5–1,1
	clay/silt stone		1,1–3,4	2,2	2,1–2,4	2,4–2,6
Sedimentary rock	sandstone		1,9–4,6	2,8	1,8–2,6	2,2–2,7
	conglomerate/breccia		1,3–5,1	2,3	1,8–2,6	2,2–2,7
	marlstone		1,8–2,9	2,3	2,2–2,3	2,3–2,6
	limestone		2,0–3,9	2,7	2,1–2,4	2,4–2,7
	dolomitic rock		3,0–5,0	3,5	2,1–2,4	2,4–2,7
	sulphate rock (anhydrite)		1,5–7,7	4,1	2,0	2,8–3,0
	sulphate rock (gypsum)		1,3–2,8	1,6	2,0	2,2–2,4
	chloride rock (rock salt, potash)		3,6–6,1	5,4	1,2	2,1–2,2
	anthracite		0,3–0,6	0,4	1,3–1,8	1,3–1,6
	tuff		1,1	1,1		
Magmatic rock	vulcanite, acid to intermediate	e.g. rhyolite, trachyte	3,1–3,4	3,3	2,1	2,6
		e.g. latite, dacite	2,0–2,9	2,6	2,9	2,9–3,0
	vulcanite, alkaline to ultra-alkaline	e.g. andesite, basalt	1,3–2,3	1,7	2,3–2,6	2,6–3,2
	plutonite, acid to intermediate	granite	2,1–4,1	3,2	2,1–3,0	2,4–3,0
		syenite	1,7–3,5	2,6	2,4	2,5–3,0
	plutonite, alkaline to ultra-alkaline	diorite	2,0–2,9	2,5	2,9	2,9–3,0
		gabbro	1,7–2,9	2,0	2,6	2,8–3,1
Metamorphic rock	slightly metamorphic	clay shale	1,5–2,6	2,1	2,2–2,5	2,4–2,7
		chert	4,5–5,0	4,5	2,2	2,5–2,7
	moderately to highly metamorphic	marble	2,1–3,1	2,5	2,0	2,5–2,8
		quartzite	5,0–6,0	5,5	2,1	2,5–2,7
		mica schist	1,5–3,1	2,2	2,2–2,4	2,4–2,7
		gneiss	1,9–4,0	2,9	1,8–2,4	2,4–2,7
		amphibolite	2,1–3,6	2,9	2,0–2,3	2,6–2,9
Other materials	bentonite		0,5–0,8	0,6	~3,9	
	concrete		0,9–2,0	1,6	~1,8	~2,0
	ice (–10 °C)		2,32		1,87	0,919
	synthetics (HD-PE)		0,42		1,8	0,96
	air (0 °C to 20 °C)		0,02		0,0012	0,0012
	steel		60		3,12	7,8
	water (+10 °C)		0,59		4,15	0,999

7.4 Laboratoriummethodes voor de bepaling van de thermische geleidbaarheid

Indien de temperatuur van het materiaal niet verandert gedurende de tijd is de steady-state methode bruikbaar. Dit vereenvoudigt de analyse van het meetsignaal, maar vereist een weloverwogen en goed ontworpen proefopzet. Er bestaan verschillende standaarden:

- Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus (ASTM C177)
- Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus (ASTM C518)
- Standard test method for evaluating the resistance to thermal transmission of materials by the guarded heat flow meter technique (ASTM E1530)

Transiënte methodes meten tijdens het opwarmingsproces van het monster. Hierdoor verloopt de meting sneller. Metingen gebeuren meestal door middel van een plaat- of naaldsonde. Voorbeelden van standaarden zijn:

- Standard test method for thermal conductivity of refractories by hot wire (platinum resistance thermometer technique) (ASTM C1113)
- Refractory materials – Determination of thermal conductivity – Part 1: Hot-wire methods (cross-array and resistance thermometer) (ISO 8894-1:2010)
- Plastics – Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (Hot Disk) method. (ISO/DIS 22007-2.2)
- Standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure (ASTM D5334)

7.5 Thermische Respons Test (TRT)

7.5.1 Concept

De Thermische Respons Test (TRT) maakt het mogelijk om de geothermische parameters op een nauwkeurige manier en op een bepaalde locatie te bepalen (Desmedt & Draelants, 2009). De test resulteert in de thermische geleidbaarheid, λ , van de grond over de volledige sondelengte, mogelijk beïnvloed door de effectieve grondwaterstroming. Daarnaast kan uit een TRT ook de thermische weerstand van de boorgatwarmtewisselaar, R_b , bepaald worden. De methode is gebaseerd op de wet van Fourier voor warmtegeleiding. Deze wet stelt dat de warmteflux in een materiaal evenredig is aan de temperatuurgradiënt, dT/dx , en de warmtegeleidbaarheid, λ (zie vergelijking (1)).

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

7.5.2 Theoretische achtergrond

Indien de lengte van de bodemwarmtewisselaar voldoende groot is ten opzichte van de diameter ervan, dan kan deze beschouwd worden als een lijnbron. Door aan deze lijnbron een

constante warmteflux aan te leggen, kan de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond en de boorgatweerstand (en/of de warmtecapaciteit van de ondergrond) afgeleid worden (bijvoorbeeld volgens het Infinite Line Source Model (ILS)). Hierbij worden naast het feit dat de bodemwarmtewisselaar wordt vereenvoudigd tot een (oneindig lange) lijnbron, nog enkele belangrijke veronderstellingen gemaakt (Witte, 2012):

- Warmtegeleiding is het enige warmtetransport dat plaatsvindt. De theoretische benadering houdt dus geen rekening met advection (dit is gedwongen convection) door bijvoorbeeld natuurlijke grondwaterstroming onder invloed van een hydraulisch verhang. Bij een hoog toegevoegd vermogen ($> 50 \text{ W/m}$) kan convection ook thermisch geïnduceerd worden. Hierbij ontstaat grondwaterstroming door een verschil in densiteit tussen warm en kouder water.
- De eigenschappen van het geteste medium zijn isotroop en ruimtelijk quasi-constant (warmtegeleidbaarheid, warmtecapaciteit, begintemperatuur).
- Het geleverd vermogen is constant, of nog beter de toegevoegde energieflex is constant.
- Er is geen axiaal warmtetransport (of de interne warmtecapaciteit van de boorgatwarmtewisselaar kan verwaarloosd worden).

Bij klassieke bodemwarmtewisselaars met een boorgatdiameter van 100 tot 150 mm en een lengte van meer dan 50 meter is de vereenvoudiging tot een oneindige lijnbron gerechtvaardigd. De randeffecten aan de boven- en onderkant van de bodemwarmtewisselaars kunnen immers verwaarloosd worden. Nadat de boorgatweerstand overwonnen is, kan de boorgatwand beschouwd worden als de bron van de warmteflux.

Voor de toepassing van de 'lijnbrontheorie' op energiepalen dient de nodige omzichtigheid in acht genomen te worden. Doordat de diameter meestal groter en de lengte aanzienlijk korter is dan bij klassieke bodemwarmtewisselaars, kunnen effecten aan boven- en onderkant van de paal en veroorzaakt door de grotere diameter en de interne warmtecapaciteit van het beton mogelijk niet verwaarloosd worden. Zo kan axiaal warmtetransport en een grotere interne warmtecapaciteit tot een overschatting van de warmtegeleidbaarheid van de bodem leiden (Witte, 2009). Ook kunnen schommelingen in de omgevingstemperatuur een grotere invloed hebben op de resultaten, aangezien een vrij groot deel van de paal zich bevindt in een zone die onderhevig is aan dagelijkse temperatuurschommelingen.

7.5.3 Praktische uitvoering

7.5.3.1 Installatie bodemwarmtewisselaar

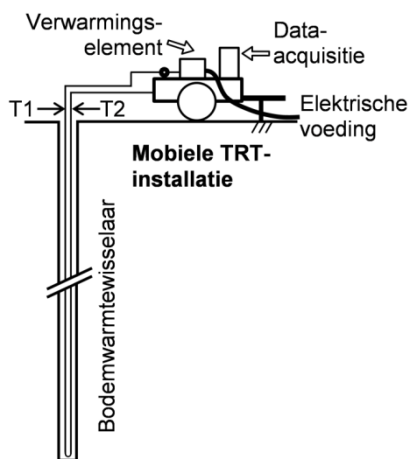
De bodemwarmtewisselaar moet op een correcte manier geïnstalleerd worden. In hoofdstuk 5 van de voorlopige Europese Norm CEN/TC341 N525 wordt de procedure beschreven. Hierbij moet de nodige aandacht worden besteed aan de boring, de installatie van de bodemwarmtewisselaar en de opvulling van het boorgat. Al deze parameters kunnen de TRT-

resultaten beïnvloeden. De installatie dient ook gecontroleerd te worden door middel van debiet- en druktests.

7.5.3.2 Testapparatuur

De apparatuur vereist voor de uitvoering van een TRT (Figuur 87) bestaat uit (CEN/TC 341 N525, 2011):

- Verwarmingselement (bijvoorbeeld elektrische weerstand)
- Circulatiepomp
- Data-acquisitiesysteem (meting van het geleverd vermogen, debiet, ingangs- en uitgangstemperatuur dragervloeistof, omgevingstemperatuur gedurende de hele test, minstens elke 10 minuten)



Figuur 87. Testopstelling van een Thermische Respons Test (TRT) naar Sanner et al. (2000).

Specifieke vereisten voor de testapparatuur zijn (CEN/TC 341 N525, 2011):

- De testapparatuur moet thermisch stabiel zijn.
- De testapparatuur moet toelaten *verschillende belastingstappen* in te stellen.
- De circulatiepomp moet de aanpassing van de hoeveelheid dragervloeistof dat circuleert toelaten.
- Veiligheidsapparatuur moet aanwezig zijn (tegen oververhitting, debietproblemen, enz.).
- Warmte-uitwisseling van de testapparatuur met de omgeving moet tot het minimum beperkt worden door isolatie.
- De verbinding tussen testapparatuur en boorgatwarmtewisselaar moet kleiner zijn dan 1.5 m.
- Er wordt *bij voorkeur water* gebruikt als dragervloeistof.
- De leidingen moeten helemaal ontlucht worden (de installatie moet voorzien zijn van luchtkleppen).

- Meetnauwkeurigheid van dragertemperatuur (0.3°C), geleverd vermogen (10%), debiet (5%).
- De testapparatuur moet in staat zijn een turbulente stroming te leveren en een geschikt vermogen (gewoonlijk 40 tot 80 W/m boorgat of voldoende om een temperatuurverschil van 3 tot 7°C tussen in- en uitgang van de bodemwarmtewisselaar te verkrijgen).
- De standaarddeviatie van het toegevoegde vermogen moet lager zijn dan ±1.5% van het gemiddelde vermogen en pieken in het vermogen moeten binnen een grens blijven van ±10% van het gemiddelde vermogen.

7.5.3.3 Testprocedure

Een correct uitgevoerde thermische respons test (TRT) volgt volgende testprocedure (CEN/TC 341 N525, 2011):

- Een periode van 3 tot 5 dagen tussen de opvulling van het boorgat en het begin van de TRT moet gerespecteerd worden, afhankelijk van de warmtegeleidbaarheid van de grond (minimaal 5 dagen voor $\lambda < 1.7$ W/m/K). Er dient ook rekening gehouden worden met hydratatiewarmte ten gevolge van de uitharding van cement grouts.
- De temperatuur van de grond in rust moet opgemeten worden voor aanvang van de test. Dit kan op twee manieren:
 - o Via een rechtstreekse meting van de temperatuur in de bodemwarmtewisselaar (zonder circulatie van dragervloeistof).
 - o Door het met hoge resolutie opmeten van de temperatuur van de dragervloeistof gedurende de eerste 10 tot 20 minuten nadat de circulatiepomp in werking werd gesteld (zonder opwarmen van de dragervloeistof).
- Gedurende de TRT wordt de dragervloeistof aan een vast debiet (voldoende om een turbulent stromingsregime te garanderen) doorheen de bodemwarmtewisselaar verpompt. Tegelijkertijd wordt een constant vermogen toegevoegd aan de dragervloeistof. Het debiet wordt verder zo gekozen dat het temperatuurverschil tussen in- en uitgang van de bodemwarmtewisselaar 3-7°C bedraagt. Het geïnjecteerde vermogen moet gelijk zijn aan 40 tot 80 W/m boorgat. Hoe lager de warmtegeleidbaarheid van de bodem, des te lager het geïnjecteerde vermogen. Hoe meer het geïnjecteerde vermogen aansluit bij het geschatte, toekomstig verbruikt vermogen, hoe representatiever de resultaten zullen zijn.
- Pas na een bepaalde testduur, t_1 , zijn de metingen geschikt om de warmtegeleidbaarheid te bepalen. De minimale testduur, t_1 , kan bepaald worden aan de hand van vergelijking (2):

$$t_1 = \frac{5r_0^2}{\alpha} \quad (2)$$

Waarin r_0 de straal (m) van het boorgat is en α de thermische diffusiviteit (m²/s). Herinner dat $\alpha = \lambda/(\rho c_p)$, met een realistische inschatting voor de waarden van λ en ρc_p .

- De totale testduur moet minstens $t_1 + 36$ uur bedragen. De test moet dus lang genoeg worden aangehouden. Enerzijds moet de temperatuur van de dragervloeistof minstens 10°C gestegen zijn ten opzichte van de initiële bodemtemperatuur. Anderzijds wordt een minimale testduur van 48 à 50 uur vooropgesteld.
- In volgende gevallen moet de testduur verlengd worden:
 - o Bij het gebruik van grout of andere boorgatvulling met een warmtegeleidbaarheid $< 1.3 \text{ W/m/K}$.
 - o Indien duidelijke temperatuurschommelingen worden waargenomen. Dit maakt het mogelijk de variatie statistisch te compenseren (niet noodzakelijk voor testevaluatie met parameterschatting met numerieke modellen, zie paragraaf 7.5.4 over de interpretatie van de TRT).
- Het thermisch vermogen, $Q \text{ (W)}$, dat gedurende test aan de bodem werd afgegeven kan berekend worden op basis van vergelijking (3):

$$Q = \rho c_p \cdot D \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

Waarin ρc_p de volume gerelateerde warmtecapaciteit ($\text{J/m}^3/\text{K}$) van de dragervloeistof voorstelt, D het debiet in de bodemwarmtewisselaar (m^3/s) en T_{in} en T_{out} de in- en uitgangstemperatuur van de dragervloeistof in de bodemwarmtewisselaar.

- Indien om eender welke reden de test voor het voorziene einde werd stopgezet of indien men een nieuwe TRT op hetzelfde boorgat wil uitvoeren, moet men de nodige tijd in acht te nemen totdat de grond zich terug in zijn initiële toestand bevindt (dit is binnen een range van 0.28°C rond de initiële grondtemperatuur). Dit duurt minstens 10 tot 14 dagen, afhankelijk van de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond.

In het geval van energiepalen kan een TRT uitgevoerd worden, al raadt de Ground Source Heat Pump (GSHP) Association aan deze uit te voeren op een klassieke bodemwarmtewisselaar in een vroege dimensioneringsfase van het project.

Voor paaldiameters groter dan 300mm moet hoe dan ook een aangepaste TRT uitgevoerd worden, mogelijk met langere testduur en meer geavanceerde interpretatiemethodes. Bovendien moet de nodige tijd voorzien worden opdat de paaltemperatuur zich in evenwicht kan stellen met de omringende grondtemperatuur vooraleer de test begint. Door hydratatiwarmte die vrijkomt tijdens het uitharden van het beton kan dit oplopen tot 60 dagen na de uitvoering van de paal. Het uitvoeren van een thermo-mechanische paalbelastingsproef met monitoring van de optredende rekken in de paal wordt eveneens aangeraden.

7.5.4 Interpretatie

7.5.4.1 Testresultaten

Volgende parameters worden opgemeten gedurende de TRT:

- De ingangstemperatuur, $T_{in}(t)$, van de dragervloeistof in de bodemwarmtewisselaar in functie van de tijd (°C)
- De uitgangstemperatuur, $T_{uit}(t)$, van de dragervloeistof in de bodemwarmtewisselaar in functie van de tijd (°C)
- Het gemiddelde geïnjecteerde vermogen, Q (W)
- De warmteafgifte per meter boorgat, q (W/m), gelijk aan Q/H met H de diepte van het boorgat
- Het debiet, D (m³/s)
- Omgevingsfactoren (omgevingstemperatuur, ...)

Er bestaan in grote lijnen twee methodes voor de evaluatie van de testresultaten. Enerzijds kan de 'lijnbrontheorie' gebruikt worden, anderzijds kan een 'parameterschatting' gebeuren aan de hand van numerieke modellen. Beide methodes steunen op warmtetransport door geleiding. De resulterende warmtegeleidbaarheid wordt dan ook de '*effectieve warmtegeleidbaarheid*' genoemd, aangezien naast geleiding nog andere warmtetransportmechanismen optreden zoals convectie. In wat volgt wordt enkel ingegaan op de interpretatie van een Thermische Respons Test met behulp van de 'lijnbrontheorie'.

7.5.4.2 Lijnbrontheorie

Definieert men de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de bodemwarmtewisselaar, $T_f(t)$ (°C), als het gemiddelde van de in- en uitgangstemperatuur, $(T_{in}(t)+T_{uit}(t))/2$, dan volgt uit de 'lijnbrontheorie' dat de evolutie van $T_f(t)$ kan beschreven worden door vergelijking (4):

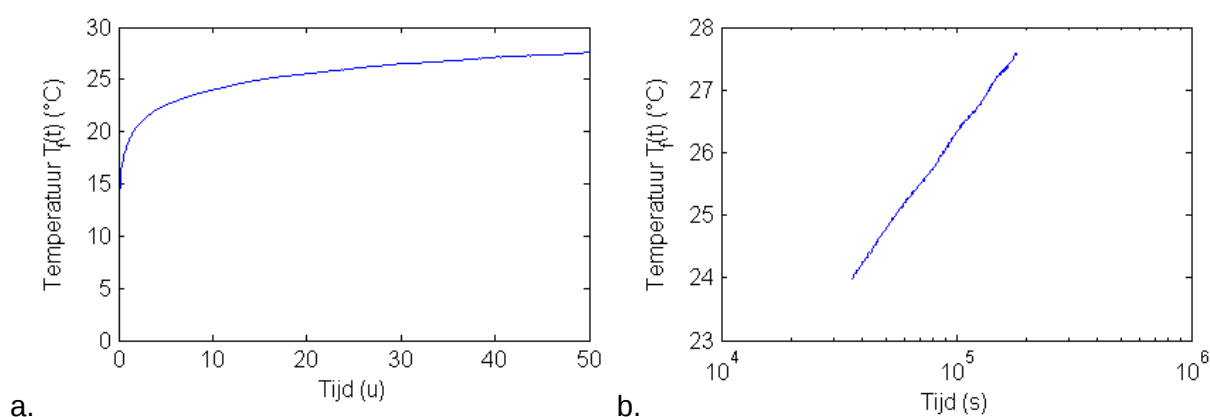
$$T_f(t) = \frac{Q}{H} \frac{1}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{Q}{H} \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_o^2}\right) - \gamma \right] + \frac{Q}{H} R_b + T_o \quad (4)$$

In deze vergelijking is Q het gemiddelde geïnjecteerde vermogen gedurende de test (W), H de diepte van de bodemwarmtewisselaar (m), λ de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond (W/m/K), α de warmtediffusiviteit van de ondergrond (m²/s), r_o (m) de straal van het boorgat, R_b (mK/W) de boorgatweerstand, T_o (K) de ongestoorde bodemtemperatuur en γ (-) de constante van Euler (=0.5772). Het verloop van $T_f(t)$ in functie van de tijd is geïllustreerd in Figuur 88.a (fictief voorbeeld).

Uit vergelijking (4) blijkt dat de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de bodemwarmtewisselaar, $T_f(t)$, of zo men wil het temperatuurverschil tussen gemiddelde vloeistoftemperatuur en ongestoorde bodemtemperatuur, $T_f(t)-T_o$, een lineair verloop kent in functie van het logaritme van de tijd bij een constant geïnjecteerd vermogen, Q . Dit is geïllustreerd in Figuur 88.b (fictief voorbeeld). Vereenvoudigend kan vergelijking (4) dus geschreven worden als:

$$T_f(t) - T_0 = k \cdot \ln(t) + m \quad (5)$$

Als de temperatuur na de minimale testduur, t_1 , evolueert naar een lineair verloop (gebruik makende van een logaritmische schaal voor de tijd, t), dan kan de benaderende aanpak van de 'lijnbrontheorie' toegepast worden ter bepaling van de warmtegeleidbaarheid en boorgatweerstand (mits aanname van een waarde voor de warmtecapaciteit die vervat zit in de warmtediffusiviteit, α (zie paragraaf 7.5.4.4)). De meest voor de hand liggende berekeningswijze wordt in de volgende paragrafen verder besproken.



(a) Gemiddelde vloeistoftemperatuur, $T_f(t)$, in de bodemwarmtewisselaar in functie van de tijd. (b) Gemiddelde vloeistoftemperatuur, $T_f(t)$, in de bodemwarmtewisselaar in functie van de tijd (weergegeven vanaf $t = 10u$, logaritmische schaal).

Figuur 88. Fictief voorbeeld van de resultaten van een TRT.

De belangrijkste beperkingen van de lijnbrontheorie zijn de volgende:

- De resulterende warmtegeleidbaarheid is een gemiddelde over de hele diepte van het boorgat. Er wordt dus geen onderscheid gemaakt tussen verschillende grondlagen.
- De lineaire trend wordt pas na verscheidene uren zichtbaar.
- De methode veronderstelt een uniforme begintemperatuur over de diepte van het boorgat.
- De methode gaat enkel uit van warmtetransport in de bodem door middel van geleiding. Effecten zoals axiaal warmtetransport doorheen het boorgat, warmte-uitwisseling met de omgeving en convectie ten gevolge van de grondwaterstroming zorgen voor een afwijking van de berekende warmtegeleidbaarheid ten opzichte van de reële warmtegeleidbaarheid.

7.5.4.3 Warmtegeleidbaarheid

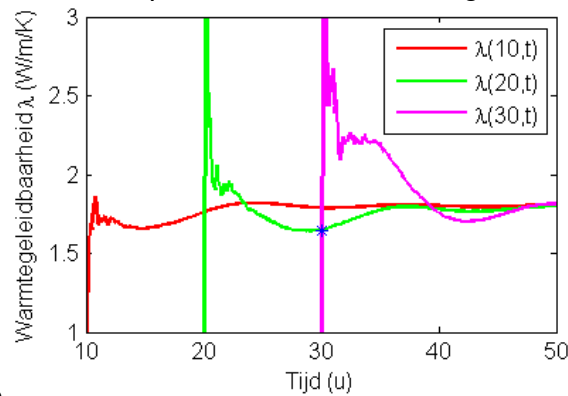
De warmtegeleidbaarheid, λ , kan bepaald worden uit de helling, k , van het lineaire verloop van het temperatuurverschil tussen vloeistoftemperatuur en ongestoorde bodemtemperatuur, $T_f(t) - T_0$, in functie van het logaritme van de tijd (vergelijking (6)):

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot k} \quad (6)$$

De stabiliteit en convergentie van de berekende warmtegeleidbaarheid kan men controleren door de evolutie ervan weer te geven in functie van de tijd, t_{eind} , voor verschillende starttijden, t_{start} :

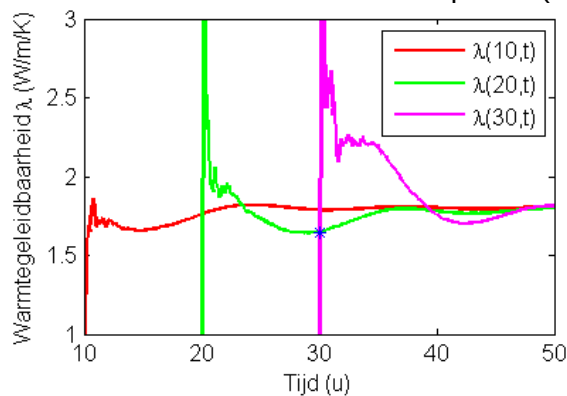
$$\lambda(t_{start}, t_{eind}) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot k(t_{start}, t_{eind})} \quad (7)$$

$k(t_{start}, t_{eind})$ is de helling van de lineaire regressie toegepast op alle meetgegevens tussen de starttijd, t_{start} , en de eindtijd, t_{eind} . Om de betrouwbaarheid van de resultaten te garanderen moet t_{start} groter zijn dan de minimale testduur, t_1 . Het is ook aangewezen t_{eind} voldoende groter te nemen dan t_{start} voor een meer representatieve lineaire regressie. In het fictieve voorbeeld



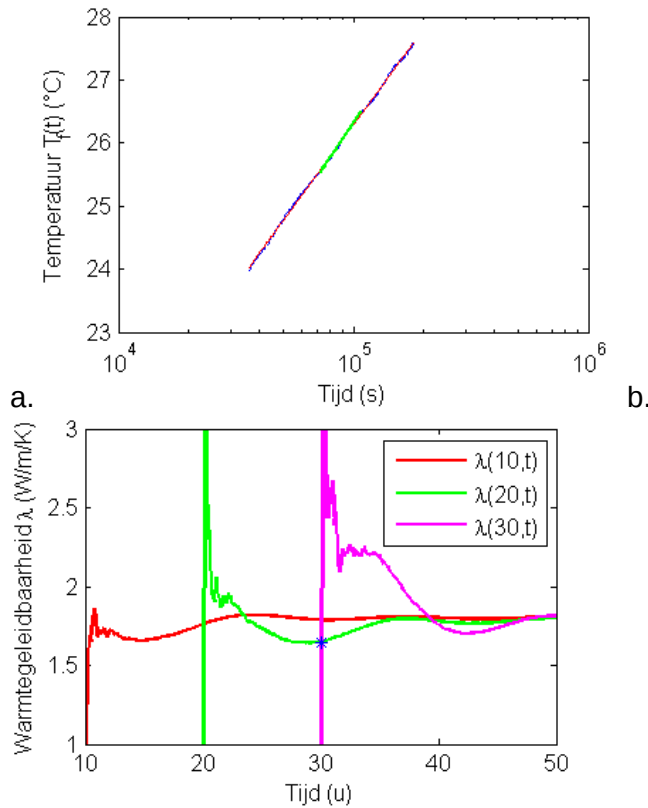
is t_1 gelijk aan 10 uur. b.

Figuur 89.a toont het resultaat van de lineaire regressie toegepast op de gegevens tussen $t = 10$ en $50u$ en $t = 20$ en $30u$. Merk op dat $\lambda(10,50)$ dezelfde waarde geeft als vergelijking (6).



b.

Figuur 89.b toont het verloop van $\lambda(t_{start}, t_{eind})$ voor verschillende starttijden. Pas voor grotere waarden van t_{eind} wordt de resulterende λ -waarde stabiel.



Figuur 89. (a) Gemiddelde vloeistoftemperatuur, $T_f(t)$, in de bodemwarmtewisselaar in functie van de tijd (logaritmische schaal). Het resultaat van de lineaire interpolatie toegepast op de gegevens tussen $t = 10$ en 50μ $\lambda(10,50)$ en $t = 20$ en 30μ $\lambda(20,30)$ is geïllustreerd. (b) Verloop van $\lambda(10,t)$, $\lambda(20,t)$ en $\lambda(30,t)$ in functie van de tijd.

7.5.4.4 Boorgatweerstand

Nadat de warmtegeleidbaarheid, λ , bepaald is, kan ook de thermische weerstand tussen de vloeistof in de sonde en de boorgatwand, kortweg de boorgatweerstand, R_b , bepaald worden op basis van de gemeten waarden tijdens de thermische respons test (vergelijking (8)):

$$R_b = \frac{H}{Q} (T_f(t) - T_0) - \frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln(t) + \ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2}\right) - 0.5772 \right) \quad (8)$$

De enige onbekende in deze vergelijking is de warmtediffusiviteit, $\alpha (= \lambda/\rho c_p)$. Voor de volume gerelateerde warmtecapaciteit, ρc_p , kan een literatuurwaarde worden aangenomen. De zo geïntroduceerde fout is eerder beperkt in vergelijking met de fout afkomstig van andere parameters zoals de warmtegeleidbaarheid en de boorgatdiameter. Net als de warmtegeleidbaarheid kan R_b uitgezet worden in functie van de tijd wat zou moeten evolueren naar een constante waarde voor R_b .

7.5.4.5 Warmtecapaciteit

Indien de boorgatweerstand nauwkeurig gekend is, dan is het mogelijk de warmtecapaciteit van de grond rondom de bodemwarmtewisselaar af te leiden uit de meetgegevens door vergelijking (8) te herschrijven naar de warmtediffusiviteit, α . In de praktijk wordt dit echter weinig toegepast.

7.5.5 Alternatieve interpretatiemogelijkheden

Met vergelijking (4) kan men λ en R_b ook bepalen aan de hand van een parameterschatting waarbij de resulterende waarden voor λ en R_b de beste overeenkomst geven tussen de theoretische curve en het verloop van de meetwaarden (Gehlin and Spitler, 2001). Deze manier van interpreteren steunt eveneens op de 'lijnbrontheorie'.

Een alternatieve theorie die vaak wordt voorgesteld is de 'cylindrical heat source method', die het boorgat als een eindige cilinder beschouwt. Ten slotte kunnen ook numerieke algoritmes en gespecialiseerde software gebruikt worden voor de interpretatie van de meetgegevens.

7.5.6 TRT in een praktische en economische context

Een nauwkeurige inschatting van de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond is belangrijk voor de dimensionering van het thermische systeem en de juiste bepaling van de benodigde lengte aan bodemwarmtewisselaars. Dit is nodig om de goede werking op korte en lange termijn te garanderen zodat (1) de geothermische installatie te allen tijde voldoet aan het vooropgestelde aandeel in de pieklast van het gebouw en (2) de regeneratie van de ondergrond voldoende of zelfs volledig kan plaatsvinden. Indien dit door onderdimensionering niet het geval is (bijv. te weinig lengte aan bodemwarmtewisselaars of een te hoog voorspelde warmtegeleidbaarheid), dan heeft dat zware gevolgen (Sanner et al., 2008):

- De temperatuur van de dragervloeistof neemt sneller af en daalt tot een lagere temperatuur.
- De COP van de warmtepomp daalt (geen efficiënte werking, geen optimaal rendement).
- De operationele kost verhoogt.
- In extreme gevallen een volledige uitval van en mogelijke schade aan het volledige systeem.

In het andere uiterste is het bodemwarmtewisselaarveld overgedimensioneerd wat dan weer leidt tot meer meters aan bodemwarmtewisselaar dan strikt noodzakelijk en bijgevolg een onnodig hoge initiële investeringskost. Voor de optimalisatie van een (geo-)thermisch systeem is de uitvoering van een thermische respons test (TRT) dus onontbeerlijk.

Toch stuit men in vele gevallen op enkele belangrijke nadelen. Zo brengt een TRT een aanzienlijke bijkomende kost met zich mee. Men mag ook niet vergeten dat de uitvoering van een TRT een extra inspanning vergt in de planning van een project. Niet alleen moet men na

het boren immers de nodige wachttijd voorzien vooraleer men de test kan starten (3 tot 5 dagen), de test zelf neemt ook nog eens 3 tot 5 dagen in beslag. Zo komt men aan minimaal 6 tot 10 dagen tussen het boren en het einde van de TRT op ditzelfde boorgat. Pas daarna kan een beslissing genomen worden met betrekking tot het totaal aantal te boren meters. Ten slotte moet bij de resultaten van een TRT ook rekening worden gehouden met een mogelijke fout op de warmtegeleidbaarheid van 5 tot 10% (Witte, 2012).

Het is duidelijk dat een TRT voor kleine projecten niet economisch rendabel is. Het zal meestal interessanter zijn een schatting te maken van de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond (bijv. met de rekentool die door WTCB wordt ontwikkeld) en de boorgatweerstand (op basis van literatuur- en/of ervaringsgegevens). Door de onzekerheid moeten dan wel extra meters aan boringen voorzien worden, wat mogelijk leidt tot overdimensionering van het geothermisch systeem en dus een hogere initiële investeringskost dan strikt noodzakelijk.

Pas voor meer grootschalige projecten waarbij hoe dan ook een groot aantal meters geboord moeten worden, wordt de uitvoering van een TRT economisch interessant en praktisch haalbaar zonder al te grote bijkomende kosten. Zo wordt een hogere investeringskost vermeden en is de optimale werking van de geothermische installatie gegarandeerd, ook op langere termijn.

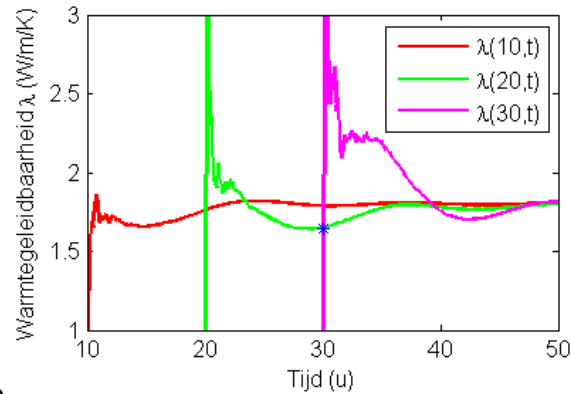
Merk ten slotte nog op dat wanneer grote onzekerheid over de lokale geologie en/of de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond bestaat, de uitvoering van een TRT hoe dan ook onontbeerlijk kan zijn, ongeacht de grootte van het project.

7.5.7 Invloed grondwaterstroming

Wanneer de bodemwarmtewisselaar zich in een watervoerende laag (aquifer) bevindt waarin een zekere grondwaterstroming bestaat, moet de warmtegeleidbaarheid afgeleid uit een TRT met de nodige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Door de grondwaterstroming gaat de warmte die toegevoerd wordt tijdens de TRT sneller afgevoerd worden dan wanneer enkel conductie in het spel is. De lijnbrontheorie gaat echter enkel uit van warmteafvoer ten gevolge van conductie doorheen de ondergrond en houdt geen rekening met de invloed van het grondwater. De berekende waarde voor de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond zal dus hoger zijn dan in werkelijkheid het geval is.

Gedurende een TRT zorgt de afvoer van warmte door grondwaterstroming ervoor dat de gemiddelde temperatuur van de dragervloeistof, $T_f(t)$, in functie van de tijd afvlakt. Of met andere woorden, de helling van de rechte $T_f(t)$ in functie van het logaritme van de tijd zal na

verloop van tijd afzwakken. Grondwaterstroming leidt er bovendien toe dat de curves van



$\lambda(10,t)$, $\lambda(20,t)$ en $\lambda(30,t)$ uit b.

Figuur 89.b niet convergeren naar een constante en/of dezelfde waarde. Dit kan de interpretatie van de TRT-resultaten aanzienlijk compliceren.

De aanwezigheid van grondwaterstroming rond een bodemwarmtewisselaar kan zowel een positief als negatief effect hebben op de prestaties van het bodemsysteem, afhankelijk van de toepassing (ISSO, 2005). Wanneer enkel warmte onttrokken (of toegevoerd) wordt, voert grondwaterstroming continu warmte aan (af) waardoor de bodemtemperatuur rond de bodemwarmtewisselaar minder snel zal afnemen (toenemen) dan wanneer geen grondwaterstroming aanwezig is. Dit is uiteraard positief. Anderzijds, wanneer warmte of koude in de grond wordt gestockeerd, dan zal grondwaterstroming het bufferend effect van de grond deels tenietdoen door de opgeslagen energie af te voeren vooraleer deze kan benut worden. De grootte van dit effect is afhankelijk van de grondwatersnelheid in relatie tot de grootte van het bodemsysteem. De ISSO 73-publicatie stelt als globale richtlijn dat het effect van grondwaterstroming kan verwaarloosd worden bij snelheden kleiner dan 5 m per jaar.

7.6 Aanwezigheid van nutsleidingen

7.6.1 Op privé domeinen

De eigenaar of beheerder van het terrein waarop men de mechanische boring uitvoert, dient de aanwezigheid en positie van de nutsleidingen te melden.

7.6.2 Op openbare domeinen

De sondeerfirma vraagt de ligging van ondergrondse kabels en nutsleidingen aan. Voor proeven op openbare terreinen gebeurt dit altijd, voor proeven op privéterrein in zoverre relevant. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen proeven uitgevoerd op terreinen behorend tot het Vlaams, Brussels of Waals Gewest:

o Vlaams Gewest

De sondeerfirma vraagt de ligging van de ondergrondse nutsleidingen op via het KLIP-portaal (www.klip.be). De KLIP-aanvraag dient uiterlijk 20 werkdagen en niet meer dan 40 werkdagen vóór de effectieve uitvoering van de proeven door de uitvoerder te gebeuren (een KLIP-aanvraag duurt 20 werkdagen, en is 2 maand geldig).

o Brussels Gewest

De sondeerfirma vraagt de ligging van de ondergrondse nutsleidingen op via het KLIP-portaal (www.klip.be). De KLIP-aanvraag dient uiterlijk 20 werkdagen en niet meer dan 40 werkdagen vóór de effectieve uitvoering van de proeven door de uitvoerder te gebeuren (een KLIP-aanvraag duurt 20 werkdagen, en is 2 maand geldig). Het KLIP-decreet is echter enkel geldig in het Vlaamse Gewest, en de leidingen en kabelbeheerders zijn daarom niet verplicht hun ondergrondse kabels en nutsleidingen via KLIP te registreren. De KLIP-aanvraag wordt wel automatisch doorgestuurd naar klim-cicc (www.klim-cicc.be).

De sondeerfirma contacteert dan de betrokken gemeenten om een lijst met leidingen en kabelbeheerders te verkrijgen. Aansluitend worden alle betreffende beheerders aangetekend aangeschreven om informatie over de gewenste locaties te bekomen.

o Waals Gewest

De sondeerfirma vraagt de gegevens betreffende ondergrondse nutsleidingen en kabels op via <http://impetrants.met.wallonie.be> voor leidingen beheerd door de Service Public de Wallonië en via klim-cicc (www.klim-cicc.be voor andere leidingen).

De sondeerfirma contacteert dan de betrokken gemeenten om een lijst met leidingen en kabelbeheerders te verkrijgen. Aansluitend worden alle betreffende beheerders aangetekend aangeschreven om informatie over de gewenste locaties te bekomen.

7.7 Minder courante boormethodes

Volgende boormethodes worden weinig tot niet gebruikt voor de toepassing van verticale bodemwarmtewisselaars. Ze kunnen evenwel in bepaalde omstandigheden toch interessant zijn. Daarom worden ze volledigheidshalve kort beschreven.

7.7.1 Avegaar boren

Bij een avegaarboring wordt de grond los gefreesd door een schroef. De schroef staat tevens in voor het transport van de grond naar het maaiveld. De methode wordt voornamelijk toegepast in cohesieve gronden.

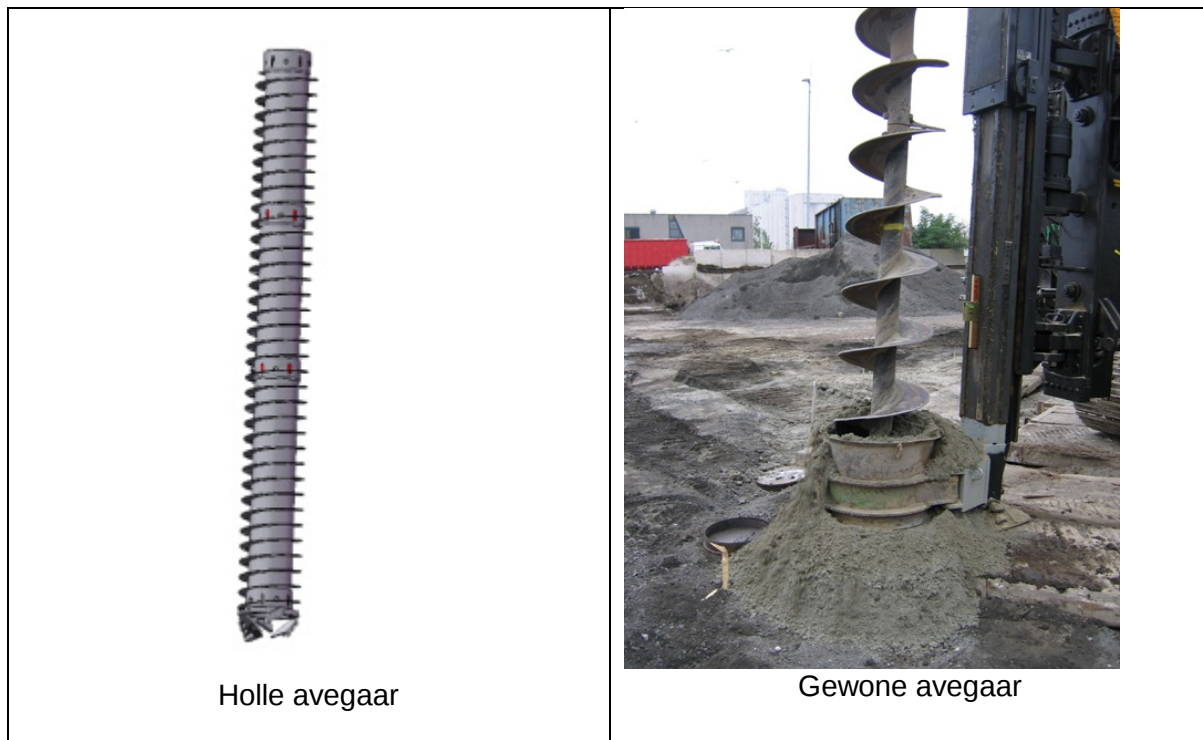
Er wordt een onderscheid gemaakt tussen een holle avegaar en een gewone avegaar.

Bij een **holle avegaar** ligt de schroef rond een holle buis. De holle buis doet dienst als steunbuis die aan de onderzijde is afgesloten met een klep. Eens op diepte kan deze klep worden geopend om de put of bodemwarmtewisselaar verder in te bouwen.

De methode kan gebruikt worden boven en onder het grondwater.

De holle avegaar kan worden gebruikt tot een diepte van circa 35 meter.

Bij de **gewone avegaar** is er geen holle buis aanwezig in de boorbuizen, maar is een zware centrale stang omwonden door een brede spiraal. Indien men niet werkt in cohesieve gronden, zal na het verwijderen van de boorbuizen het boorgat instorten. Om dit te vermijden is het noodzakelijk om met een tijdelijke externe verbuizing te werken. *De techniek is toepasbaar tot een diepte van 30 meter.*



Figuur 90: avegaar

Omwille van het moeilijk aanbrengen van de omstorting wordt deze techniek zelden gebruikt.

De toepassingen zijn eerder te vinden in de aanleg van funderingspalen en het milieutechnisch onderzoek.

Eventueel kan de avegaar boormethode, afhankelijk van het type grond dat wordt aangeboord, toegepast worden in combinatie met de pulsboormethode.

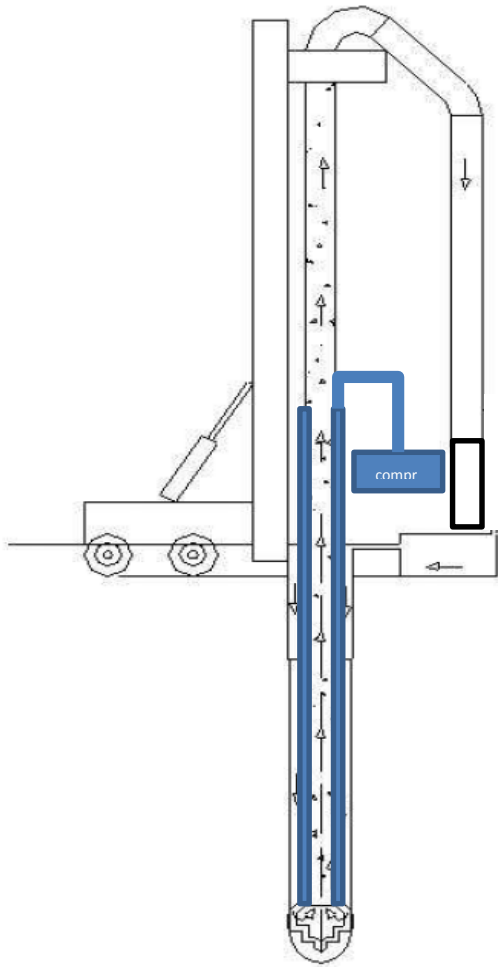
Voordelen :

- goede bodembeschrijving bij holle avegaar
- geen toevoer van bodemvreemde stoffen
- weinig waterverbruik

Nadelen :

- diameters en diepte beperkt wegens grote krachten op de avegaar
- versmering van de boorgatwand tengevolge van de verbuizing
- bij de holle avegaar is het niet mogelijk om een goede aanvulling van de bron te bekomen
- zware investering in materieel voor de gebruikelijke diameters en dieptes van grondwaterwinningen en verticale bodemwisselaars

7.7.2 Luchthevelboren, airlift boren



Figuur 91: luchthevelboren

Een variante op de indirecte boring is de zogenaamde luchthevel- of airlift boring.

Het opwaarts transport van de boorspecie gebeurt doorheen de concentrische annulaire ruimte van de dubbelwandige boorstangen. De opwaartse stroming wordt in stand gebracht door lucht via een compressor te injecteren net boven de beitel. Opdat het systeem kan werken is een initiële waterkolom in het boorgat van een aantal meters noodzakelijk. Anders zou de te weinig gecomprimeerde lucht gewoon doorheen het spoelwater naar boven borrelen en geen transport van boorspecie veroorzaken.

7.7.3 Counterflushboren

Roterend verbuisd boorsysteem met dubbelwandige boorstangen voor boringen van 150 mm diameter en maximaal 80 meter diepte. De roterende buitenboorbuis steunt het boorgat. Het boorteam pompt het werkwater onder druk in de annulaire ruimte tussen de binnen- en buitenboorbuis naar beneden, waar het in de boorkop de binnenbuis in stroomt en boorgruis en de boorkern naar het maaiveld transporteert. Los geboord materiaal bezinkt in bezinkbakken. Door de beperkte hoeveelheid werkwater die volledig wordt opgevangen en de grote vrije doorlaat van de boorkop is de monsterneming zeer volledig.

Diepte en dikte van scheidende lagen kunnen vrij nauwkeurig bepaald worden. Het maken van een boorbeschrijving op < 50 cm nauwkeurig is mogelijk, maar het boorbedrijf moet aantonen dat het dit kan realiseren en dat het afsluitende lagen met een nauwkeurigheid < 50 cm kan terugplaatsen. Doordat het boorgat niet wordt gesteund door wateroverdruk valt dit boringtype in dezelfde groep als de puls boring.

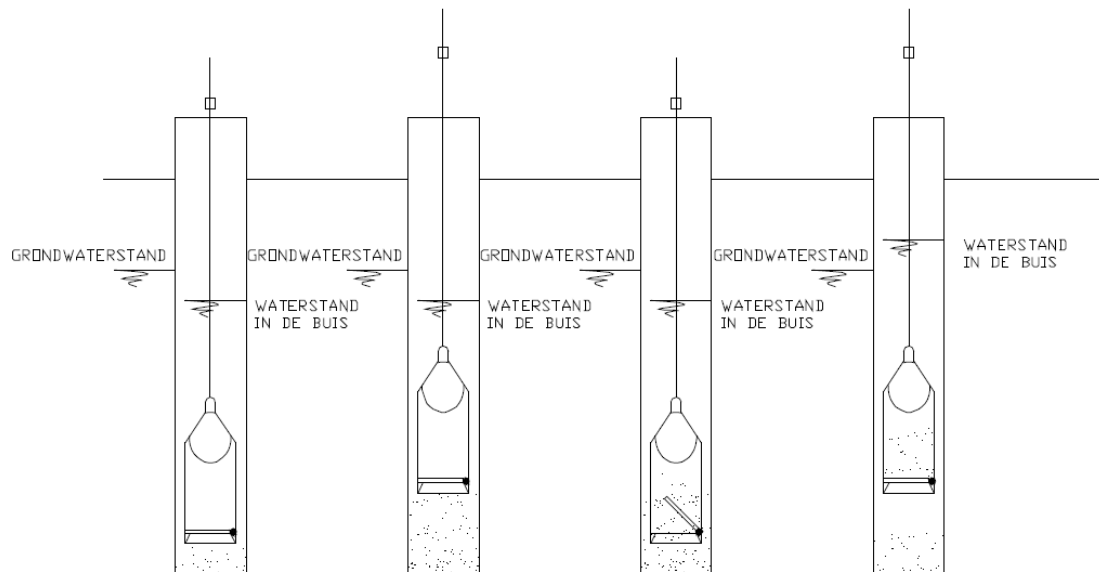
7.7.4 Pulsboren

De boorpuls bestaat uit een stalen holle buis die voorzien is van een snijschoen en een terugslagklep (de puls). De snijschoen wordt gekozen in functie van de ondergrond.

Tijdens het boren wordt de puls opgehaald en neergelaten waardoor de snijschoen in de bodem van het boorgat dringt en deze loswoelt. Het boorgruis vermengt zich door de op en neergaande beweging met het water in het boorgat. Tijdens een neergaande beweging vloeit de boorsuspensie in de boorpuls.

Na enkele tientallen slagen wordt de puls omhoog gehaald waarbij de terugslagklep zich sluit. De puls wordt geleegd aan het maaiveld en weer in de boorbuis gebracht waarna het proces zicht terug herhaald.

Tijdens het ophalen van de puls stroomt in de ruimte onder de puls grondwater in de verbuizing en voert tegelijkertijd zand mee uit de onderliggende laag. Hierdoor ontstaat er ruimte aan de onderkant van de verbuizing, waardoor de verbuizing dieper ingebracht kan worden. De boorstangen hebben een lengte van 1,5 meter en m.b.v. een schroefdraadverbinding kunnen deze aan elkaar worden bevestigd, nadat de vorige boorbuis in de grond is gedrukt.



Figuur 92: pulsboren, bron VITO

7.7.5 Slagboren

Bij slagboringen brengt het boorteam middels slagen op de boorstang de boorstang in de bodem, waarbij de grond verdrongen wordt. Bij slagboringen zijn systemen beschikbaar waarbij gebruik gemaakt wordt van een valgewicht, waarbij enkele slagen per minuut worden gehaald. Bij andere systemen wordt gebruik gemaakt van een pneumatisch mechanisme, waarbij enkele slagen per seconde worden gehaald. Bij deze methode wordt geen werkwater gebruikt. Het bepalen van diepte en dikte van scheidende lagen vereist een continue monsterneming

7.7.6 Indrukken

Bij deze techniek ontstaat een boorgat door het wegduwen van de grond door verdichting. In bepaalde formaties van slappe klei of goed doorlatende losgepakte zanden kunnen op deze wijze gaten gerealiseerd worden met een beperkte diameter.

7.7.7 Sonisch boren of intrillen

De boormachine is uitgerust met een boorkop die een hoogfrequente trilling genereert en overzet op de boorbuis. Bij de punt van de boorbuis gebeurt een verdichting door de liquefactie van het grond/water mengsel. Door het gewicht van de boormachine wordt de boorbuis verder in de grond getrild. Deze techniek is toepasbaar in goed doorlatende ondergrond. In kleihoudende zanden kan deze techniek bijvoorbeeld moeilijk worden toegepast.

De frequentie van de trilling kan geoptimaliseerd worden in functie van de geologische ondergrond.

Bij het boren met een verloren punt kan er een peilbuis, filter of warmtelus geplaatst worden. Op de boorbuis kan ook een waterslot geplaatst worden. Hierdoor ontstaat er een constante druk in de boorbuis. Met behulp van het waterslot kan een profielboring met ongeroerde monsters genomen worden.

7.7.8 Samenvattende tabel

TABEL	Directe spoeling, direct flush, straight flush		Omgekeerde spoeling, reversed flush, zuigboren		Luchthevel, airlift boren		Counterflushboren		Pulsboren		Avegaarboren		Hamerboren		Sonisch, intrillen		Indrukken	
Snelheid	Hoog: Tientallen m/u	++	Redelijk	+	Redelijk	+			Traag	--	Traag	--	Traag		Traag			
Maximum diepte	500m Meer dan 3000m (VL)	++	100m, Diepte van losse formaties	+	Zolang voldoende watertoevoer is		80m	-	100m	-	30-35m		Beperkt, Honderden meters (VL)		Beperkt, 100-150m		Beperkt	
Maximale diameter	350-400mm 600mm (VL)		1200-1500mm		Grote diameters		150-300mm		beperkt		Beperkt		< 600mm		Beperkt gangbaar tot 150mm		Beperkt	
Economisch	Goedkoop	++	Matig	+	Goedkoop	+			Slecht	--	Slecht	-	Redelijk duur	-	Goedkoop	++		
Beschrijving bodem	Onnauwkeurig	--	Goed	+	Redelijk tot goed	+	Zeer goed	++	Zeer goed	++	Goed	+	Goed	+	Geen, tenzij met waterslot	--	Geen	-
Waternutverbruik	Hoog		Hoog						Laag		laag		geen		Geen		Weinig	
Verspreiding verontreiniging	Mogelijk	-	Mogelijk	-														
Risico invallen boorwand	Mogelijk	-			Stabiel	+			Stabiel	++	Groot bij niet-cohesieve grond							
Formaties	zand, klei Rots, krijt		Losse formaties, Kan in harde formaties		Losse formaties, Kan in harde formaties		Alle gronden (aldus MOW geotechniek)		Niet voor klei, grind of steenrijke formaties		Probleem in versteende formaties		Zonder verbuizing: Niet-gescheurde grond, Met: grind, steenpuin en sterk gescheurde rots,		Problematisch in stijve klei en versteende formaties		Slappe klei, Goed doorlatend losgepakte zanden	
Combinaties met	Avegaar tot aan grondwater				Indirecte boring tot aan grondwater	-							Spoelboring tot rotsformatie					

Tabel 12: overzicht boortechnieken

7.8 Testmethoden voor bepaling van de thermische geleidbaarheid van het vulmateriaal

De thermische geleidbaarheid van grout kan in het labo worden bepaald.

Hieronder worden enkel de laboproeven besproken.

Er zijn verschillende manieren om de thermische geleidbaarheid te meten. Elk van deze is geschikt voor een beperkte range van materialen, afhankelijk van zijn thermische eigenschappen en de gemiddelde temperatuur. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen steady-state en transiente methodes

Over het algemeen is **de steady-state methode** bruikbaar als de temperatuur van het materiaal niet verandert gedurende de tijd. Dit maakt de analyse van het signaal gemakkelijk. Het nadeel is wel dat er een weloverwogen en ontworpen proefopzet nodig is.

Transiente methoden meten tijdens het opwarmingsproces. Het voordeel is dat de meting sneller gebeurt. De metingen worden meestal uitgevoerd met plaat- of naaldsondes.

Plaatsondes. Hierbij wordt de plaatvormige sonde tussen twee identieke monsters geplaatst. De sonde bestaat uit een continue dubbele spiraal van nikkel waardoor er stroom vloeit zodat de sonde opwarmt. De warmte vloeit door het monster; de snelheid van het warmtetransport is afhankelijk van de thermische karakteristieken.

- **ISO/DIS 22007-2** *Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient plane heat source (Hot Disk) method*

Bij een aangepast model van plaatsonde wordt er slechts aan één zijde een monster geplaatst. Hierdoor is het mogelijk om zowel vaste monsters, als vloeistoffen, poeders en pasta's te meten.

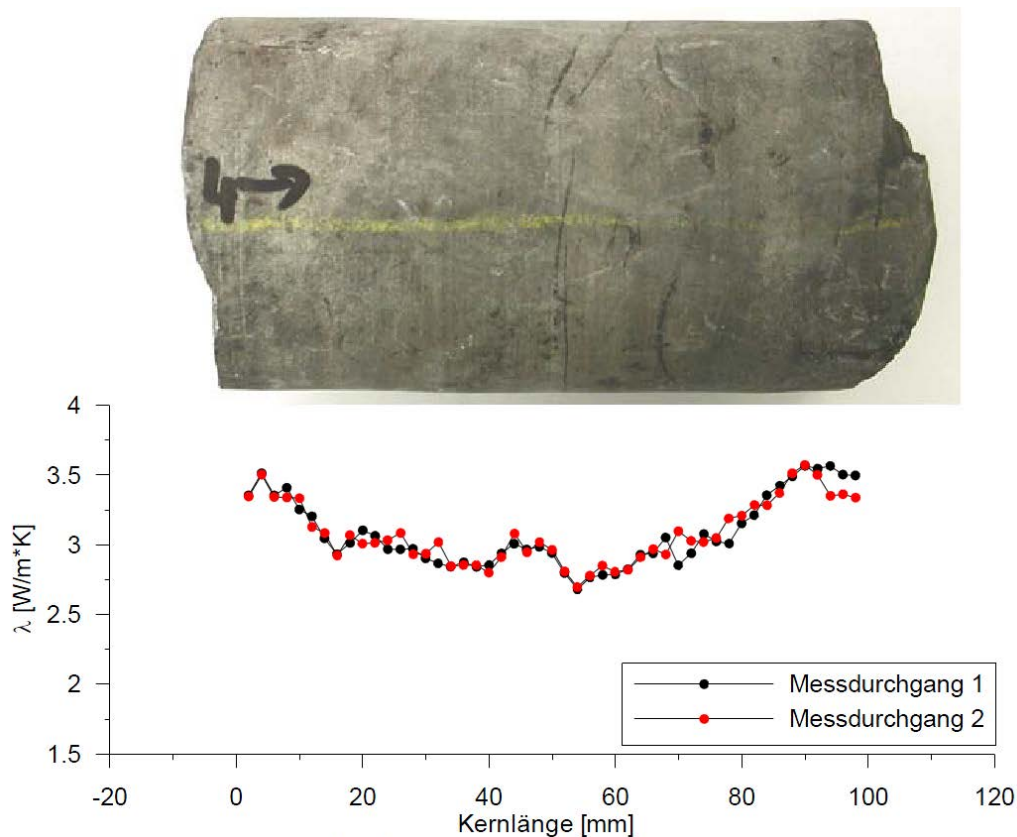
De naaldmethode of transient line source methode is de tweede methode. Hierbij wordt het temperatuursverloop gemeten op een vaste afstand van de warmtebron. In harde vaste stoffen wordt er een gat geboord waarin de meetnaald wordt bevestigd;

- **ASTM D5334-08** *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*

Thermal Conductivity Scanner

Met deze niet-gestandaardiseerde meetmethode kan de thermische geleidbaarheid van een materiaal worden gemeten. Terwijl de hierboven beschreven methoden resulteren in slechts één waarde van de thermische geleidbaarheid, meet de scanner over de volledig lijn van het proefstuk. De gemeten waarden geven een indruk van de homogeniteit van het materiaal. De scanner geeft een representatieve gemiddelde waarde voor het materiaal.





7.9 Testmethode vorstbestandheid

De vorstbestandheid wordt bepaald op basis van de norm NBN B15-231: proeven op beton – vorstbestandheid. Om de realiteit beter te benaderen worden enkele lichte afwijkingen op de norm toegepast.

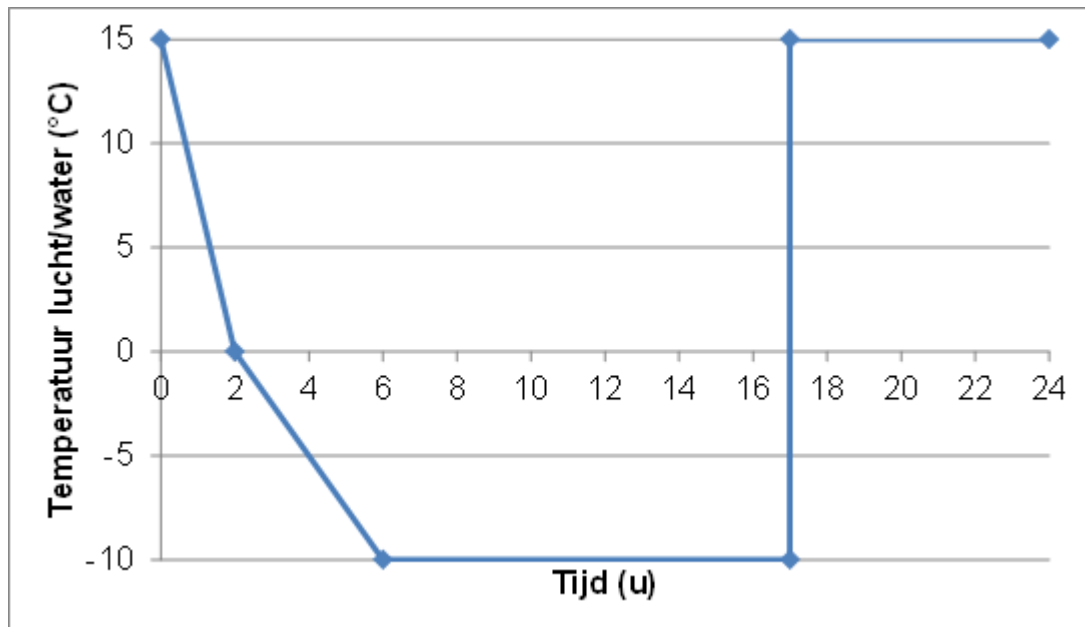
De vorst-dooi proeven worden uitgevoerd op waterverzadigde monsters. Breuken of onregelmatigheden die voor de test zichtbaar zijn op het proefstuk dienen beschreven, gefotografeerd en eventueel met een stift aangeduid te worden. Net voor aanvang van de proef wordt het monster in een waterreservoir geplaatst met een hoogte van ongeveer 1/3 de hoogte van het monster. Op deze manier blijft het monster gedurende de hele proef voor ongeveer 1/3 van zijn hoogte onder water staan. De verticale binnenranden van het waterreservoir zijn afgewerkt met samendrukbaar isolatiemateriaal van 1 à 2 cm dik. Vervolgens worden de monsters aan 28 vorst-dooi cycli onderworpen. Een cyclus duurt 24u en heeft volgend temperatuurverloop (gestuurd op de lucht- of watertemperatuur):

- Afkoelen in lucht van +15°C naar 0°C in $\pm 2u$.
- Verder afkoelen van het monster in lucht van 0°C tot -10°C in $\pm 4u$ (-2.5°C/u).
- Aanhouden van de luchttemperatuur op -10°C gedurende $\pm 11u$.
- Ontdooien onder water met een temperatuur van 10 à 15°C gedurende $\pm 7u$.

De beoordeling van de vorst-dooibestandheid gebeurt door middel van visuele inspectie op regelmatige basis (minstens elke 2 cycli). Ook het gewicht wordt voor en na de vorst-dooi proef genoteerd. Daarnaast is het aangewezen de temperatuur van het monster op te meten gedurende de proeven op verschillende niveaus van het monster (bijv. in het midden en onder

het waterniveau). Dit kan gebeuren met temperatuursondes die aan de buitenkant geïsoleerd zijn.

Onderstaande figuur geeft het opgelegd temperatuurprofiel weer gedurende 1 cyclus. Het bevriezen gebeurt in contact met lucht, het ontdooien gebeurt onder water.



Figuur 93: opgelegde temperatuurprofiel bij proef vorstbestandheid



Figuur 94: proefopstelling vorstbestandheid

7.10 Minimum spoeltijd per bodemwisselaar

Durée de rinçage

La sonde géothermique doit être rincée jusqu'à ce que l'eau propre ait au moins parcouru une fois le circuit de sonde. Dans les diagrammes suivants, la durée de rinçage minimale correspondante est indiquée pour différentes longueurs et les diamètres en fonction du débit.

Figure 32 Durée de rinçage minimale pour un passage complet du circuit de SG Ø 32 mm

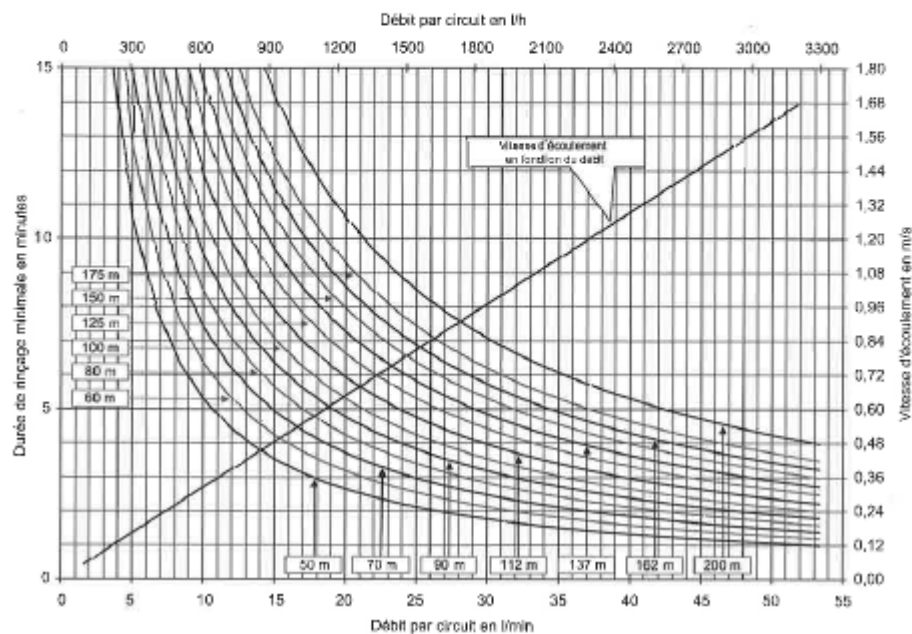
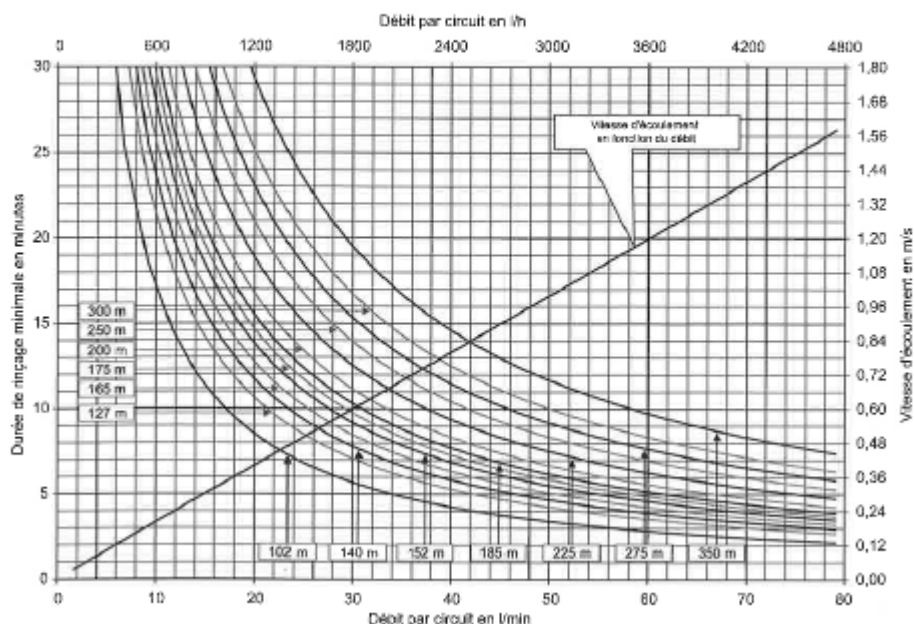
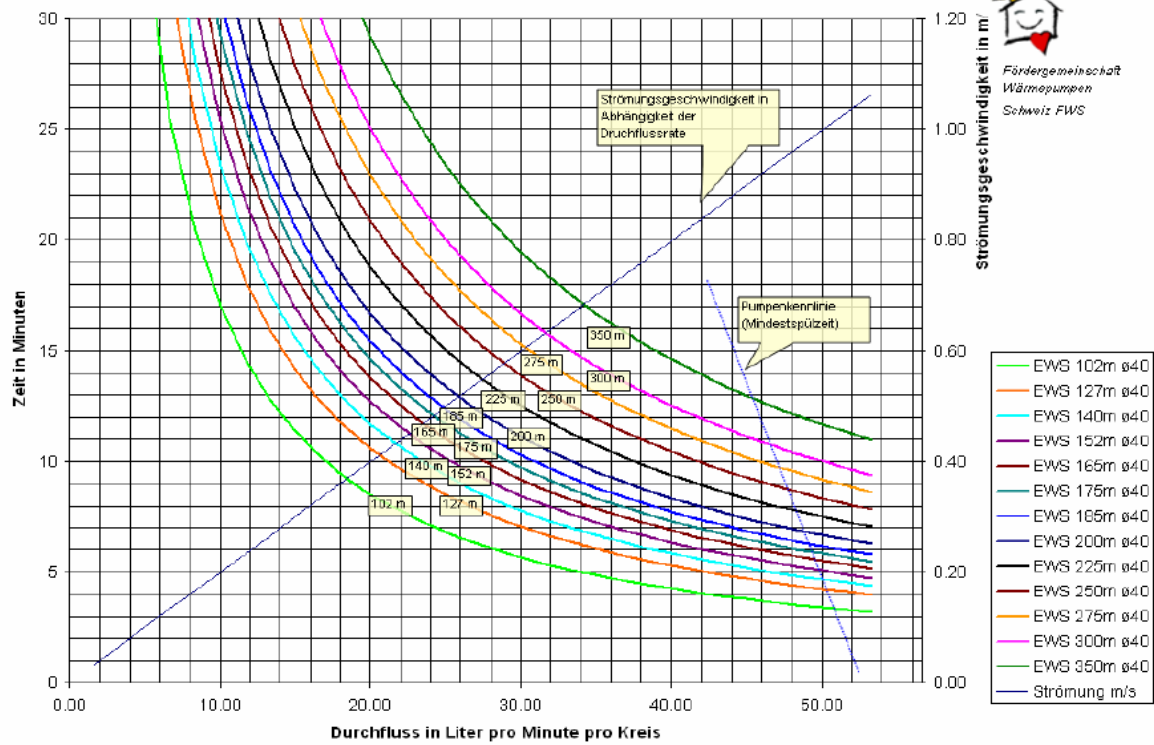


Figure 33 Durée de rinçage minimale pour un passage complet du circuit de SG Ø 40 mm



Mindestspüldauer für einen Umgang bei ø40 mm EWS



7.11 Maximum toegelaten drukval

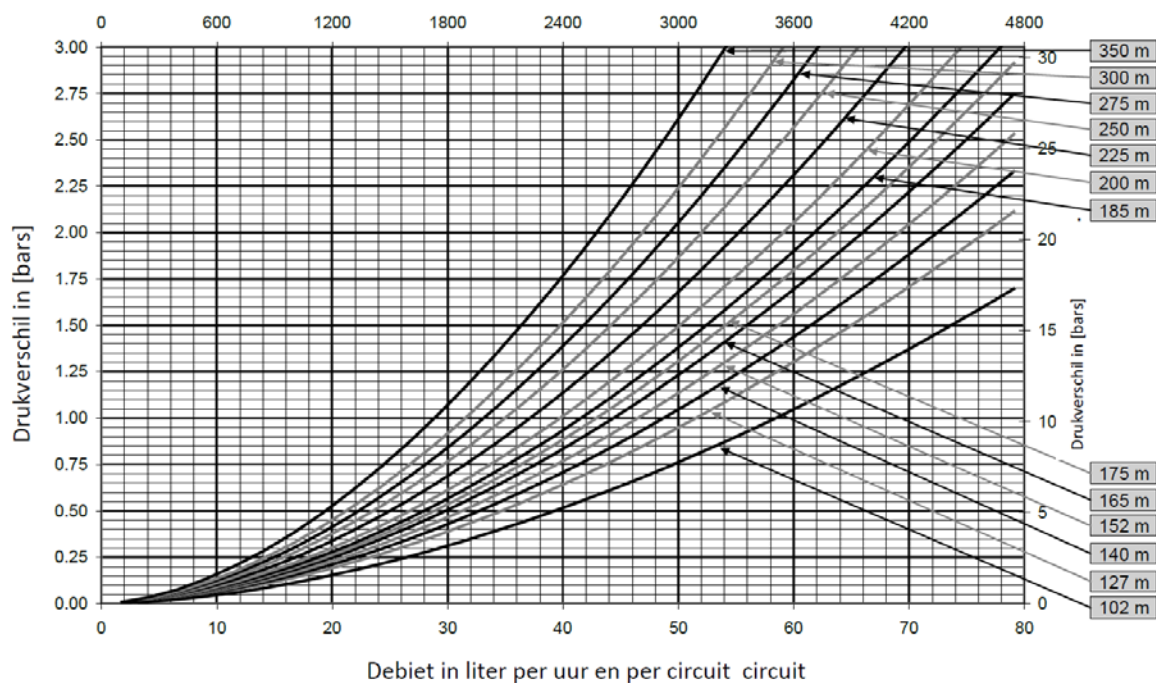


Figure 2 Diagramme de débit de SG Ø 32 x 26 mm par circuit, avec de l'eau à 15°C et différentes longueurs de sondes géothermiques

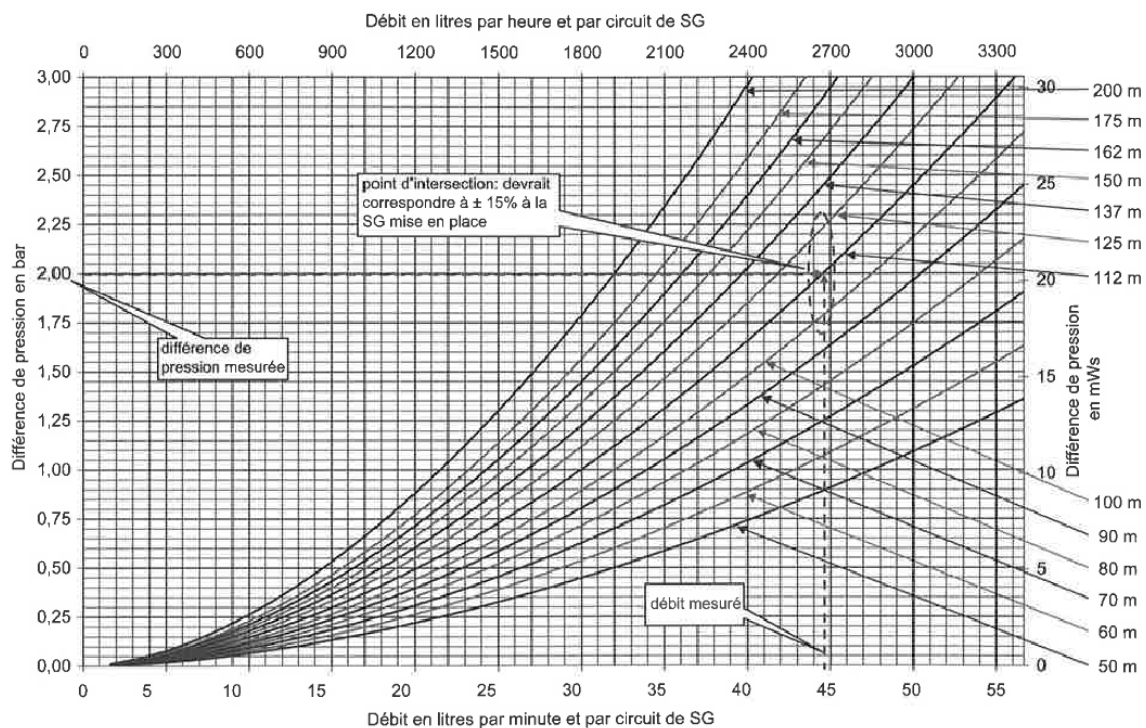
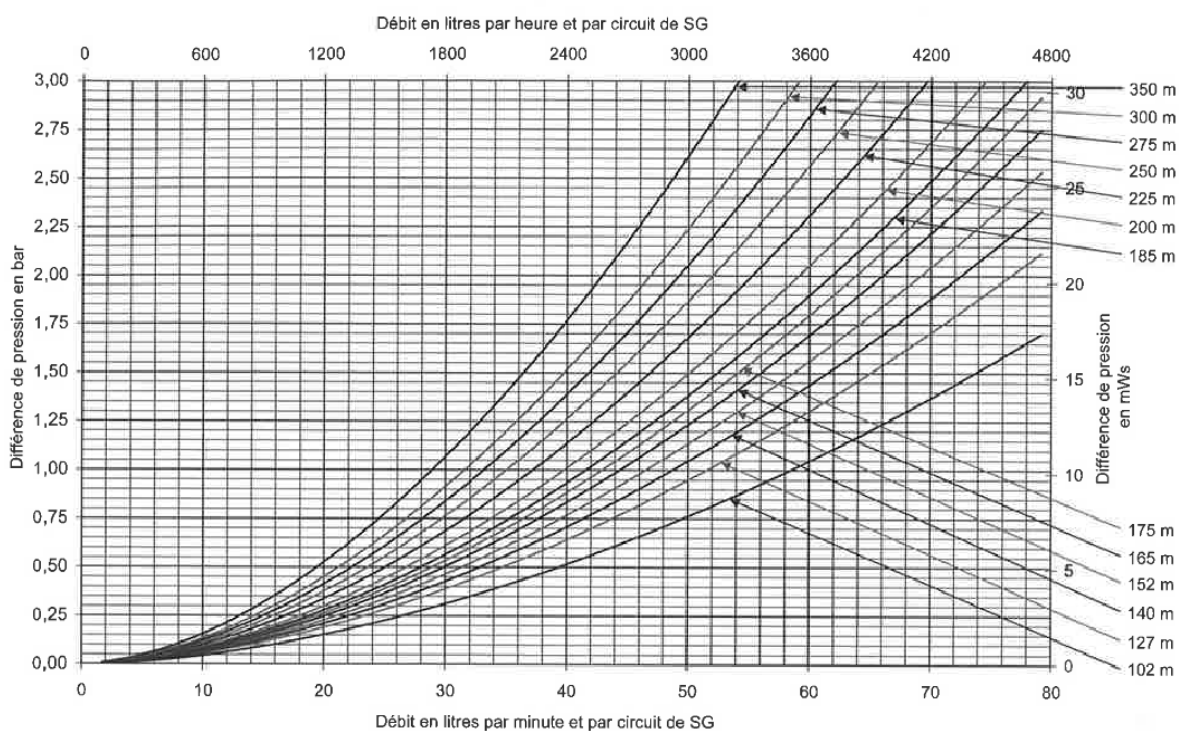
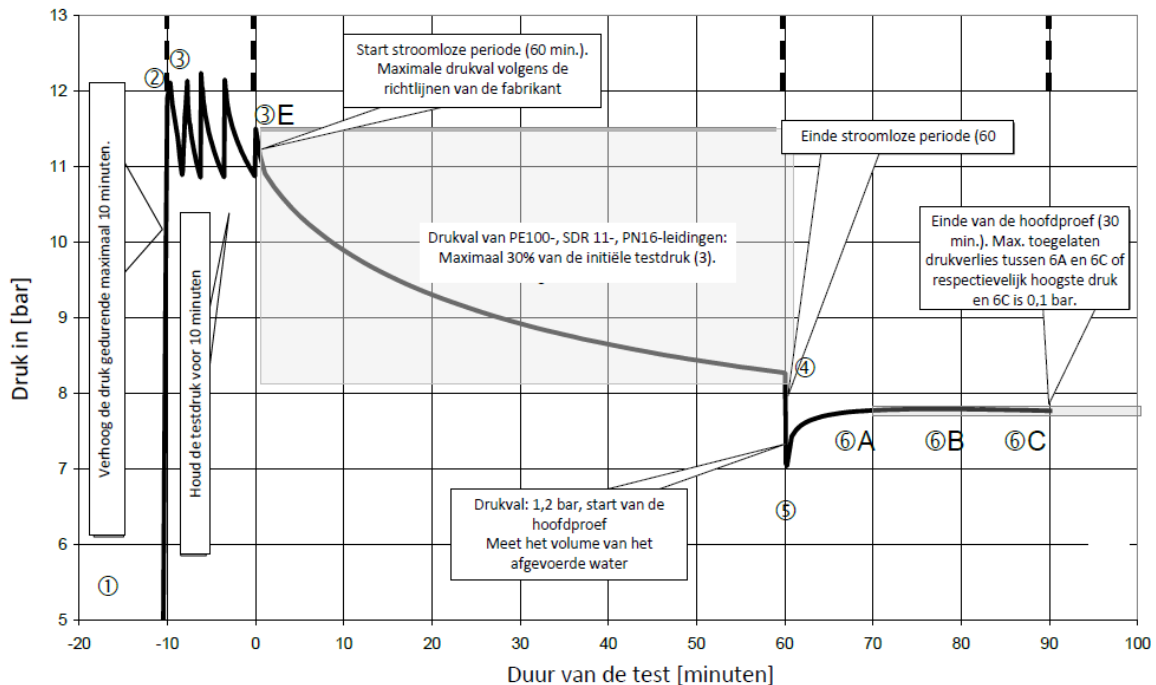


Figure 3 Diagramme de débit de SG $\varnothing 40 \times 32,6$ mm par circuit, avec de l'eau à 15°C et différentes longueurs de sondes géothermiques



7.12 Testprocedure drukproef



Testprocedure in detail

1. 1 u rustperiode. Er wordt geen overdruk op de leiding uitgeoefend
2. De bodemwarmtewisselaar wordt op de testdruk gebracht gelijk aan 1.5X de maximum bedrijfsdruk. of volgens de maximaal toelaatbare druktest opgegeven door de fabrikant.
3. 10min: op peil houden van de testdruk. (3 → 3E)
4. 1u: wachtperiode. Gedurende deze tijd zal de leiding uitzetten (3E → 4)
Meet de resterende druk. De drukvermindering veroorzaakt door de uitzetting van de leiding, mag de specificaties van de fabrikant niet overschrijden. Grotere afwijkingen zijn het gevolg van luchtinsluitels of lekken. De proef moet herhaald worden vanaf punt 1.
5. Plotse drukval met 10% van de testdruk en een minimum van 1 bar door het laten weglopen van water.
6. 10 min. Eerste drukmeting 6A
20 min. Tweede drukmeting 6B
30 min. Derde en laatste drukmeting 6C

De bodemwarmtewisselaar heeft de test doorstaan als het drukverschil (de drukval) tussen 6C en 6A niet hoger ligt dan 0,1 bar.

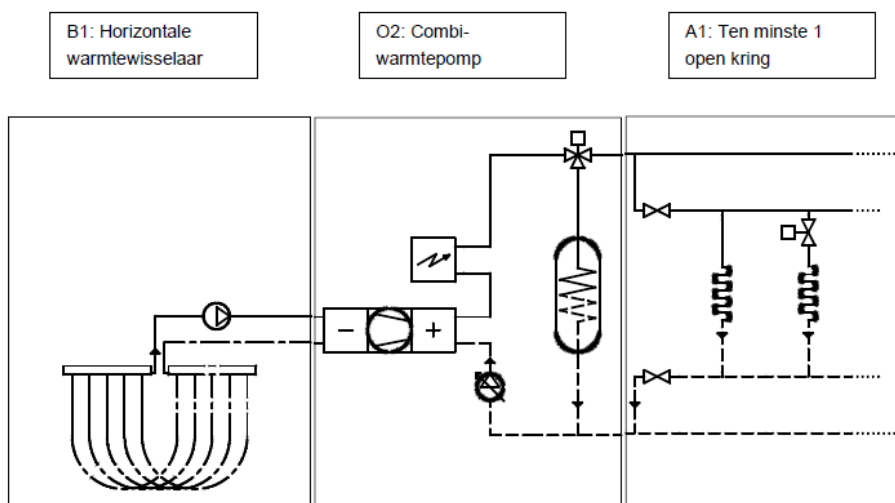
7.13 Voorbeelden hydraulische schema's

Voorbeeld 1:

- Bron: B1. Horizontale bodemwarmtewisselaar
- Opwekking: O2. Combiwarmtepomp (zonder functie van natuurlijke koeling)
- Afgifte: A1. Tenminste 1 open kring

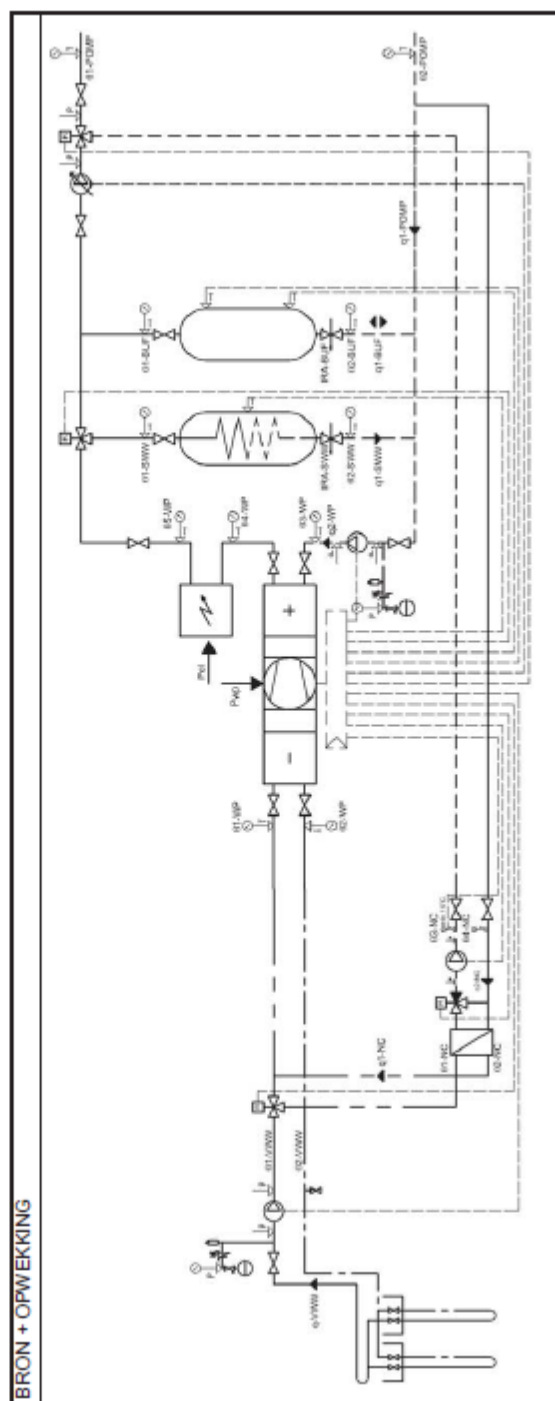
Dit installatieconcept is vooral interessant voor woningen met een relatief kleine warmtebehoefte en heeft de volgende voordelen:

- energetisch verantwoord (mits de warmtebron zorgvuldig wordt gedimensioneerd en geplaatst, bij voorkeur op een diepte van 1 meter of meer en liefst onder grondwaterniveau);
- relatief goedkoop qua investering/aanschaf (vanwege de relatief goedkope warmtebron en de relatief goedkope ruimtetemperatuurregeling).



Figuur: Basisschema voor voorbeeld 1 van een warmtepompsysteem, bestaande uit modules B1 – O2 – A1

UITGEWERKT INSTALLATIESCHEMA VOOR VOORBEELD 2:
B2. VERTICALE BODEMWARMTEWISSELAAR; O8. COMBIWARMTEPOMP + BUFFER + NATUURLIJKE KOELING; A2. GEEN OPEN KRING



8 Literatuur en normatieve documenten

DIN 18130-1: Laboratory tests for determining the coefficient of permeability of soil.

NBN EN 13598-2: Kunststofleidingssystemen voor drukloze ondergrondse rioleringen - Ongeplasticiseerd PVC (PVC-U), polypropyleen (PP) en polyethyleen (PE) - Deel 2:

Specificaties voor mangaten en inspectieputten in verkeerszones en in diep ingegraven installaties

NBN EN 1917 en NBN EN B21-101 - Toegangs- en verbindingsputten van ongewapend beton, van staalvezelbeton en van gewapend beton

ASTM D 5084: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter

NBN EN 15450 (2008): Verwarmingssystemen in gebouwen – Ontwerp van warmtepomp-verwarmingssystemen

NBN EN 805 (2000): Watervoorziening - Eisen aan distributiesystemen buitenshuis en aan onderdelen daarvan

NBN EN 12201-reeks (2013): Kunststofleidingsystemen voor drinkwatervoorziening en voor de afvoer en riolering onder druk - Polyethyleen (PE)

NBN EN 15875-reeks (2003) + addendum 2007: Kunststofleidingsystemen voor warm- en koudwaterinstallaties - Vernet polyethyleen (PE-X)

ASTM E1269-11: Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry (DSC)

ISO/DIS 22007-2 Plastics - Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity - Part 2: Transient *plane heat source (Hot Disk) method*

ASTM D5334-08 Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure

CEN/TC 341 N525 (2011). Geotechnical investigation and testing – Geothermal testing – Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger (voorlopige versie)

Vlaams Reglement betreffende de Milieuvergunning,

VDI 4640, Part 1 (2010)– Thermal use of the underground – FundamentalsFundamentals, approvals, environmental aspects

VDI 4640, Part 2 (2001)– Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems

VDI 4640, Part 3 (2001) – Utilization of the subsurface for thermal purposes – Underground thermal energy storage

Vlarem II, Bijlage 5.53.1 Code van goede praktijk voor boringen en voor exploiteren en afsluiten van boorputten voor grondwaterwinning

NF X 10-960-1, (2013): Forage d'eau et de géothermie. Sonde géothermique verticale. Partie 1: généralités

NF X 10-960-2, (2013): Forage d'eau et de géothermie. Sonde géothermique verticale.
Partie 2: boucle de sonde en polyéthylène 100 (PE100)

NF X 10-970, (2011): Forage d'eau et de géothermie. Sonde géothermique verticale.
(échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé)

ISSO publicatie 73 (2005) Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars

SIA 384/6, (2010): Sondes géothermiques

9 Bibliografie

- Acuña, J., Mogensen, P., & Palm, B. (2009). Distributed Thermal Response Test on a U-pipe Borehole Heat Exchanger. *Effstock - The 11th International Conference on Energy Storage*. Stockholm.
- Banks. (2008). *An introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Wiley-Blackwell.
- BECO. (?). *Code van goede praktijk voor de toepassing van warmtepompsystemen in de woningbouw*. Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.
- Buik, S. &. (2004). *Stromingen 10:4*.
- De Coster, D. (2010). Belgium geothermal potential: Where are the most interesting areas? *Shallow Geothermal Energy*. Brussel: SBGIMR.
- Desmedt, J., & Draelants, G. (2009). *Studie best beschikbare boortechnieken en evaluatie geschikte hydrothermische technieken in Brussel: aanvraag, kritische analyse en milieuexploitatievoorwaarden. Studie uitgevoerd in opdracht van BIM*.
- Groenholland. (2013). *Effecten van Gesloten Bodemenergiesystemen, Werkpakket 0, Referentietypen*.
- Katzenbach, R., Clauss, F., Waberseck, T., & Wagner, I. (2007). Geothermal Site Investigation - Present Developments of the Geothermal Response Test 2007. GRC Transactions.
- Kavanaugh, S., & Rafferty, K. (1997). *Fundamentals of Vertical Ground Heat Exchanger Design*.
- Laenen, B. (2009).
https://www.vito.be/NL/HomepageAdmin/Home/Subsites/Geothermie/geothermie_potentieel/Pages/geothermie_potentieel.aspx. Opgehaald van www.vito.be.
- Shonder, J., & Beck, J. (2000). *A new method to determine the thermal properties*. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory.
- Van Lysebetten, G., Huybrechts, N., & François, L. (2013). *Geschiktheidskaarten Geothermie – Thermische Geleidbaarheid Ondergrond Vlaanderen, Smart Geotherm*. Smart Geotherm.
- VDI. (2000). *VDI Richtlinien 4640, part I, Thermal use of the ground. Fundamentals, approvals, environmental aspects*. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- Witte, H. (2012). Error analysis of thermal response test (Extended version). *The 12th international conference on energy storage*, (p. 20). Innostock.
- Witte, H., & van Gelder, A. (2003). *2DEN-0.24: Kwaliteitsrichtlijn Verticale Bodemwarmtewisselaars*. Novem Publicatiecentrum.

