



Bepaling thermische karakteristieken van de ondergrond

***Auteurs: G. Van Lysebetten, N. Huybrechts, L.
François***

Datum: 08/05/2013

*Deze studie werd uitgevoerd in het
kader van het IWT-VIS traject Smart
Geotherm (2011-2017)
Versie 4*

Inhoudstafel

1	Inleiding	1
1.1	Warmtetransport	1
1.2	Warmtecapaciteit	1
1.3	Belang warmtetransport en warmtecapaciteit in geothermie	2
1.4	Definities	2
2	Laboratoriumproeven.....	4
2.1	Algemeen	4
2.1.1	Grond	4
2.1.2	Grout en beton.....	4
2.2	Methodes voor de bepaling van de warmtegeleidbaarheid (labo).....	4
2.3	Methodes voor de bepaling van de warmtecapaciteit (labo).....	5
3	In situ proeven.....	6
3.1	Thermische Respons Test (TRT)	6
3.1.1	Concept	6
3.1.2	Theoretische achtergrond.....	6
3.1.3	Praktische uitvoering.....	7
3.1.4	Interpretatie	9
3.1.5	Alternatieve interpretatiemogelijkheden	12
3.1.6	TRT in een praktische en economische context.....	13
3.1.7	Invloed grondwaterstroming	13
3.2	Distributed TRT, Enhanced TRT en recuperatietest.....	14
4	Schatting gemiddelde thermische geleidbaarheid op basis van locatie.....	15
	Referenties	16
	Bijlage A. Cijfervoorbeeld.....	17

1 Inleiding

1.1 Warmtetransport

Warmtetransport vindt plaats door drie belangrijke mechanismen:

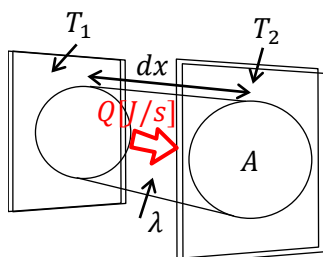
- ✓ Geleiding of conductie
- ✓ Stroming of convectie
- ✓ Straling of radiatie

In de ondiepe ondergrond zijn geleiding door het korrel skelet en poriënwater en convectie met de grondwaterstroming (advectie) de twee belangrijkste mechanismen van warmtetransport.

Warmtegeleiding of thermische conductie vindt plaats tussen twee plaatsen in een medium (vaste stof, vloeistof, gas) met een verschillende temperatuur. Energieoverdracht verloopt van de warme naar de koude plaats door moleculaire interacties ten gevolge van het verschil in kinetische energie.

De mate waarin een materiaal warmte geleidt, is in steady-state omstandigheden afhankelijk van de warmtegeleidingscoëfficiënt, λ (W/m/K), en in transiënte (tijdelijke of tijdsafhankelijke) omstandigheden van de warmtediffusiviteit, α (m²/s) (volgens de Duitse ontwerpstandaard VDI 4640 Deel 1).

De warmteoverdracht, Q (J/s of W), door een materiaal met dwarsdoorsnede, A (m²), tussen twee punten met een temperatuurverschil, $dT=T_1-T_2$ (°C), op een afstand, dx (m), van elkaar gelegen wordt gegeven door de wet van Fourier (Figuur 1 en vergelijking (1)):



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

Figuur 1. Principe wet van Fourier (naar Banks, 2008).

Warmtestroming of thermische convectie is het warmtetransport door stroming van een vloeistof of gas. In vloeistoffen en gasen is dit mechanisme gewoonlijk veel belangrijker dan warmtetransport door geleiding.

Straling of radiatie is warmteoverdracht door elektromagnetische golven van een warm naar een kouder lichaam.

1.2 Warmtecapaciteit

De warmtecapaciteit, c (J/K), is het vermogen van een medium (vaste stof, vloeistof, gas) om 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 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).

1.3 Belang warmtetransport en warmtecapaciteit in geothermie

Voor open, geothermische systemen waarbij de energie van uit de bodem onttrokken grondwater direct of indirect (d.m.v. een warmtepomp) wordt aangewend, zijn het warmtetransport (warmtegeleidbaarheid, λ , en/of warmtediffusiviteit, α) en de warmtecapaciteit van de bodem, c , slechts van weinig belang. Meer bepalende factoren zijn dan de waterdoorlatendheid, k (m/s), en de wateropslagcapaciteit, S (-), van de ondergrond. Hoe groter de waterdoorlatendheid, hoe groter het debiet zal zijn dat aan de bodem kan worden onttrokken. Bovendien impliceert een grotere wateropslagcapaciteit dat een volume grond minder snel ‘uitgeput’ raakt en de invloedstraal van de wateronttrekking beperkt blijft.

Voor gesloten systemen zijn de invloed van grondwater en grondwaterstroming zeker niet te verwaarlozen, maar de meest bepalende factoren zijn nu de thermische eigenschappen van de ondergrond, zoals de warmtegeleidbaarheid, λ , de warmtediffusiviteit, α , en de warmtecapaciteit, c . Merk op dat deze allen afhankelijk zijn van de porositeit en waterverzadigingsgraad van de grond. Naar analogie met de hydrogeologie geldt dat een groter thermisch vermogen kan onttrokken (of geïnjecteerd) worden als de warmtegeleidbaarheid en warmtediffusiviteit van de ondergrond hoger zijn. Een grotere warmtecapaciteit leidt er dan weer toe dat voor een bepaalde temperatuurverandering van de ondergrond, een grotere hoeveelheid energie kan worden onttrokken of geïnjecteerd. De bodem zal dus minder snel ‘uitgeput’ of ‘verzadigd’ worden.

De invloed van de warmtegeleidbaarheid op het totaal vereiste aantal meters boorgat wordt geïllustreerd in Bijlage A voor een uitgewerkt cijfervoorbeeld. Voor een woning met een energiebehoefte (verwarming, tapwater) van 24000kWh geeft een verlaging van de gemiddelde thermische geleidbaarheid van 2.4W/mK tot 1.2W/mK een verhoging van het totaal vereiste aantal meter boorgat van 40 tot 50%. Afhankelijk van de toegepaste ontwerpmethodiek (ISSO 73 of MIS 3005) betekent dit een toename van het absolute aantal meters boorgat van 292m tot 420m en van 334m tot 504m, respectievelijk. Een nauwkeurige bepaling van de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond is dus van groot belang, zowel voor een goede dimensionering en werking van het geothermisch systeem als op economisch vlak.

1.4 Definities

Dichtheid of soortelijk massa, ρ (kg/m³)

$\rho = \frac{m}{V}$ (kg/m³) met m de massa (kg) en V het volume (m³) van het proefmonster.

Poriënvolume, n (%)

$n = \frac{V_{holtes}}{V_{totaal}} \cdot 100$ (%) met V_{holtes} het volume holtes of poriën en V_{totaal} het totaal volume van het proefmonster.

Waterdoorlatendheid of permeabiliteit, k (m/s)

De doorlatendheid van de grond is een maat voor de snelheid waarmee een vloeistof doorheen de poriën van het korrel skelet van de grond kan stromen bij een hydraulisch verhang van 1.

Warmtegeleidbaarheid of thermische conductiviteit, λ (W/m/K)

De warmtegeleidbaarheid beschrijft hoe goed een medium warmte geleidt. Voor grond is deze afhankelijk van de mineralogische samenstelling (het kwartsgehalte), de porositeit, het vochtgehalte en de temperatuur (en materiaal fase).

Bijvoorbeeld (1): de thermische geleidbaarheid neemt af bij toenemende porositeit, maar het effect wordt gereduceerd wanneer de poriën verzadigd zijn met water (De Coster, 2010).

Bijvoorbeeld (2): de thermische geleidbaarheid van ijs is veel hoger die van water (de soortelijke warmtecapaciteit is echter lager).

Warmtecapaciteit, c (J/K)

De warmtecapaciteit is de hoeveelheid warmte (J) die in een medium kan opgeslagen worden per graad Kelvin (K).

Soortelijke warmtecapaciteit, c_p (J/kg/K)

De soortelijke warmtecapaciteit is de hoeveelheid warmte (J) die aan een medium met eenheidsmassa (kg) moet toegevoegd worden om de temperatuur ervan met één graad (K) te laten toenemen (bij constante druk).

Volume gerelateerde warmtecapaciteit, ρc_p (J/m³/K)

De volume gerelateerde warmtecapaciteit is de hoeveelheid warmte (J) die aan een medium met eenheidsvolume (m³) moet toegevoegd worden om de temperatuur ervan met één graad (K) te laten toenemen (bij constant volume).

Temperatuurvereffeningscoëfficiënt of warmtediffusiviteit, α (m²/s)

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ (m²/s) met λ de thermische geleidbaarheid (W/m/K) en ρc_p de volume gerelateerde warmtecapaciteit (J/m³/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 (Venkanna, 2010). 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). De warmtediffusiviteit, α , kan dus ook gezien worden als een maat voor de snelheid waarmee een oneffenheid in de temperatuursverdeling binnen een materiaal wordt uitgevlakt. Merk op dat de aanwezigheid van water de thermische diffusiviteit verhoogt (De Coster, 2010).

Boorgatweerstand, R_b (mK/W)

De warmteoverdrachtsweerstand tussen de ongestoorde grond en de carriervloeistof in de warmtewisselaar ten gevolge van de warmtewisselaar zelf en het omringende opvulmateriaal (grondeigen materiaal, grout, cement-bentoniet-specie, beton, etc.).

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

- Eigenschappen warmtewisselaar (materiaal, diameter, wanddikte)
- Configuratie van de warmtewisselaars (enkele of dubbele U-lus, coaxiaal; tussenafstand warmtewisselaars ~ thermische kortsluiting tussen neer- en opwaartse deel van de U-lus(sen))
- Eigenschappen dragervloeistof
- Stromingsregime
- Boorgatdiameter
- Opvulmateriaal

Boorgatdiameter, r_0 (m)

De diameter van het boorgat.

2 Laboratoriumproeven

2.1 Algemeen

2.1.1 Grond

In het geval van grondmonsters moet men een onderscheid maken tussen geroerde en ongeroerde monsters (EN1997-2). Bij geroerde monsters wordt tijdens het ontnemen geen specifieke zorg besteed om de structuur, de pakkingsdichtheid en de ‘mechanische’ karakteristieken van de grond niet te verstoren. Deze monsters kunnen gebruikt worden ter onderkenning van de grond (bijvoorbeeld korrelverdeling en mineralogische samenstelling). Indien de in situ porositeit en waterverzadigingsgraad gekend is, kan men op een onrechtstreekse manier ook een idee krijgen van de thermische geleidbaarheid van de grond in situ.

Het ontnemen van ongerode monsters is heel wat moeilijker, in het bijzonder in losse grondsoorten. Ze laten echter wel een rechtstreekse meting toe van de waterdoorlatendheid, densiteit, thermische geleidbaarheid en warmtecapaciteit van de grond in situ.

Laboratoriumproeven hebben echter beperkingen. Zo geeft een meting op een grondmonster slechts (zeer) lokale informatie. Vooral bij een heterogene opbouw van de ondergrond en bij de aanwezigheid van discontinuïteiten of breuken kunnen de laboratoriumresultaten erg afwijken van de in situ realiteit (Sanner et al., 2000). Bovendien leveren laboratoriumproeven geen aanwijzingen van het bestaan van grondwaterstroming. Deze grondwaterstroming werkt warmtetransport in de hand door middel van advectie of gedwongen convectie. Bij in situ proeven kan dergelijke grondwaterstroming wel geïdentificeerd worden (zie paragraaf 3.1).

2.1.2 Grout en beton

Het kan ook interessant zijn de thermische karakteristieken van het opvulmateriaal rond de warmtewisselaar te bepalen. In het geval van de klassieke warmtewisselaarininstallatie in een boorgat gaat dit meestal om grout. In sommige gevallen wordt ook het gebruik van grondeigen materiaal toegelaten. In het geval van energiepalen gaat dit zelfs om beton. Gezien grouts en beton uitharden zijn hiervoor specifieke proefmethodes vereist (GSHPA, 2011, 2012).

2.2 Methodes voor de bepaling van de warmtegeleidbaarheid (labo)

Er bestaan verschillende apparaten die in staat zijn de warmtegeleidbaarheid van een monster te bepalen. Welk apparaat het meest geschikt is, is afhankelijk van verschillende factoren zoals de vastheid en/of stijfheid van het gesteente/grond (bijv. graniet in vergelijking met los zand), de

ruwheid van het oppervlak (bijv. vlak of erg ongelijkmatig), enz. Deze factoren bepalen of bijvoorbeeld een thermische naaldsonde in het monster kan gedrukt worden of een sensor een goed contact kan maken met het oppervlak van het monster.

Zoals eerder opgemerkt geven deze meetmethodes slechts een lokale waarde voor de warmtegeleidbaarheid die moeilijk kan veralgemeend worden indien het om een heterogeen en/of gebroken materiaal gaat. In dit geval kan een warmtegeleidbaarheidsscanner, waarin een monster van bijvoorbeeld 30 cm wordt geplaatst, een correcter beeld geven van de warmtegeleidbaarheid. Ook van geroerde monsters kan de warmtegeleidbaarheid (bij benadering) bepaald worden. Door na de meting van de warmtegeleidbaarheid het watergehalte van het monster en het soortelijk gewicht van de korrels te bepalen, kan de warmtegeleidbaarheid van de matrix berekend worden. Op basis hiervan kan vervolgens de warmtegeleidbaarheid berekend worden voor verschillende porositeitswaarden en watergehaltes.

Er bestaan verschillende, gestandaardiseerde testmethodes. Elk van deze methodes is geschikt voor een beperkte range materialen, afhankelijk van de thermische eigenschappen ervan, en de gemiddelde temperatuur. Er wordt bovendien een onderscheid gemaakt tussen steady-state en transiënte methodes.

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)

2.3 Methodes voor de bepaling van de warmtecapaciteit (labo)

De warmtecapaciteit komt voor in formules voor de berekening van de boorgatweerstand uit Thermische Respons Tests (TRT's, in paragraaf 3.1 wordt hier dieper op ingegaan). Typische waarden voor de volume gerelateerde warmtecapaciteit, ρc_p , van grond (klei tot zand) variëren tussen 2.0 en 3.4 MJ/m³/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, 2012). Om deze reden wordt meestal een literatuurwaarde aangenomen in plaats van de warmtecapaciteit in het laboratorium te bepalen.

De warmtecapaciteit wordt bepaald door middel van een calorimeter. Er bestaan verschillende types calorimeters. Laboratoria die over apparatuur voor de bepaling van de warmtegeleidbaarheid van grondmonsters beschikken, kunnen meestal ook calorimetingen uitvoeren. Voorbeelden van standaarden zijn:

- Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry (DSC) (ASTM E1269-11)
- De Hot Disk Transient Plane Source TPS 2500 S en TPS 1500 Thermal conductivity systems laten toe de warmtegeleidbaarheid, warmtediffusiviteit en warmtecapaciteit te bepalen volgens de ISO/DIS 22007-2.2 standaard.

3 In situ proeven

3.1 Thermische Respons Test (TRT)

3.1.1 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 en 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)).

3.1.2 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 advectie (dit is gedwongen convectie) door bijvoorbeeld natuurlijke grondwaterstroming onder invloed van een hydraulisch verhang. Bij een hoog toegevoegd vermogen (> 50 W/m) kan convectie ook thermisch geïnduceerd worden. Hierbij ontstaat grondwaterstroming door een verschil in dichtheid 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 warmtewisselaars 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 warmtewisselaars, 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.

3.1.3 Praktische uitvoering

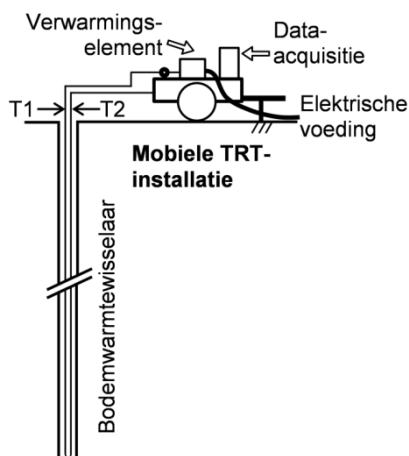
3.1.3.1 Installatie warmtewisselaar

De warmtewisselaar 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 warmtewisselaar 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 druktets.

3.1.3.2 Testapparatuur

De apparatuur vereist voor de uitvoering van een TRT (Figuur 1) 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 2. 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 warmtewisselaar 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.

3.1.3.3 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:
 - Via een rechtstreekse meting van de temperatuur in de warmtewisselaar (zonder circulatie van dragervloeistof).
 - 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 (m^2/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_I+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:
 - Bij het gebruik van grout of andere boorgatvulling met een warmtegeleidbaarheid $< 1.3 \text{ W/m/K}$.
 - 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 3.1.4 over de interpretatie van de TRT).
- Het thermisch vermogen, Q (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 warmtewisselaar (m^3/s) en T_{in} en T_{out} de in- en uitgangstemperatuur van de dragervloeistof in de warmtewisselaar.

- 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 warmtewisselaar 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.

3.1.4 Interpretatie

3.1.4.1 Testresultaten

Volgende parameters worden opgemeten gedurende de TRT:

- De ingangstemperatuur, $T_{in}(t)$, van de dragervloeistof in de warmtewisselaar in functie van de tijd ($^\circ\text{C}$)
- De uitgangstemperatuur, $T_{uit}(t)$, van de dragervloeistof in de warmtewisselaar in functie van de tijd ($^\circ\text{C}$)
- 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'.

3.1.4.2 Lijnbrontheorie

Definieert men de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de warmtewisselaar, $T_f(t)$ (°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):

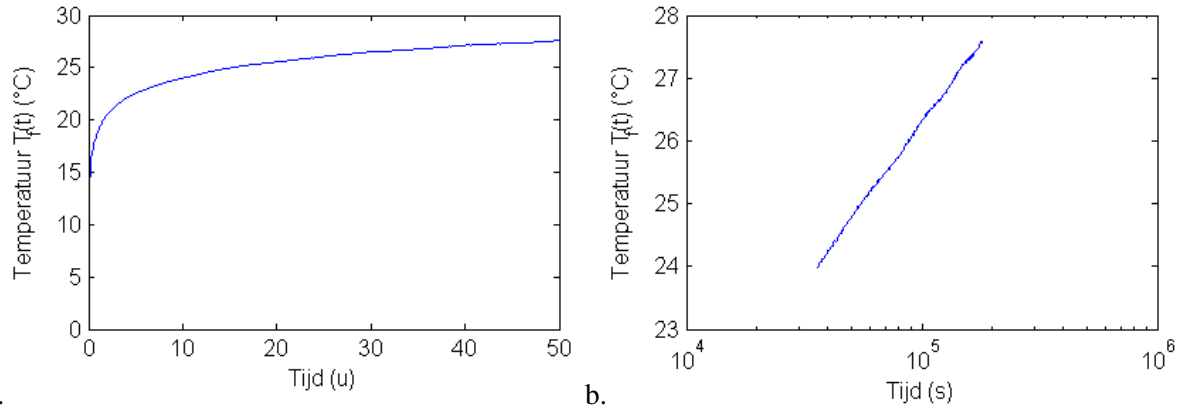
$$T_f(t) = \frac{Q}{H} \frac{1}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{Q}{H} \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4\alpha}{r_0^2}\right) - \gamma \right] + \frac{Q}{H} R_b + T_0 \quad (4)$$

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_0 (m) de straal van het boorgat, R_b (mK/W) de boorgatweerstand, T_0 (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 2.a (fictief voorbeeld).

Uit vergelijking (4) blijkt dat de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de warmtewisselaar, $T_f(t)$, of zo men wil het temperatuurverschil tussen gemiddelde vloeistoftemperatuur en ongestoorde bodemtemperatuur, $T_f(t)-T_0$, een lineair verloop kent in functie van het logaritme van de tijd bij een constant geïnjecteerd vermogen, Q . Dit is geïllustreerd in Figuur 2.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_I , 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 3.1.4.4)). De meest voor de hand liggende berekeningswijze wordt in de volgende paragrafen verder besproken.



Figuur 3. Fictief voorbeeld van de resultaten van een TRT. (a) Gemiddelde vloeistoftemperatuur, $T_f(t)$, in de warmtewisselaar in functie van de tijd. (b) Gemiddelde vloeistoftemperatuur, $T_f(t)$, in de warmtewisselaar in functie van de tijd (weergegeven vanaf $t = 10u$, logaritmische schaal).

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.

3.1.4.3 Warmtegeleidbaarheid

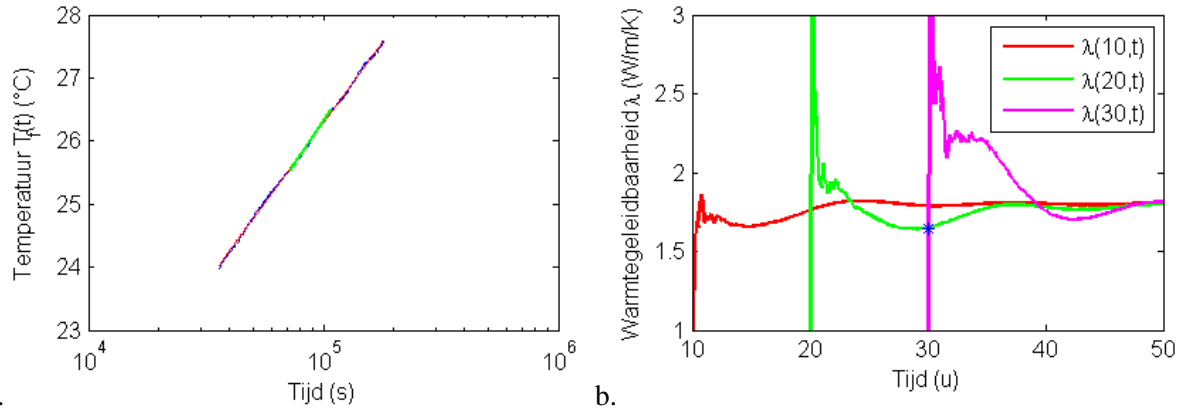
De warmtegeleidbaarheid, λ , kan bepaald worden uit de helling, k , van het lineaire verloop van het temperatuurverschil tussen vloeistoftemperatuur en ongestoorde bodemtemperatuur, $T_f(t) - T_0$, in functie van het logaritme van de tijd (vergelijking (6)):

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot k} \quad (6)$$

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. Figuur 3.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). Figuur 3.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 4. (a) Gemiddelde vloeistoftemperatuur, $T_f(t)$, in de warmtewisselaar 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.

3.1.4.4 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, α ($= \lambda/\rho c_p$). 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 .

3.1.4.5 Warmtecapaciteit

Indien de boorgatweerstand nauwkeurig gekend is, dan is het mogelijk de warmtecapaciteit van de grond rondom de warmtewisselaar af te leiden uit de meetgegevens door vergelijking (8) te herschrijven naar de warmtediffusiviteit, α . In de praktijk wordt dit echter weinig toegepast.

3.1.5 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.

3.1.6 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 warmtewisselaar 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.

3.1.7 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 Figuur 3.b niet convergeren naar een constante en/of dezelfde waarde. Dit kan de interpretatie van de TRT-resultaten aanzienlijk compliceren.

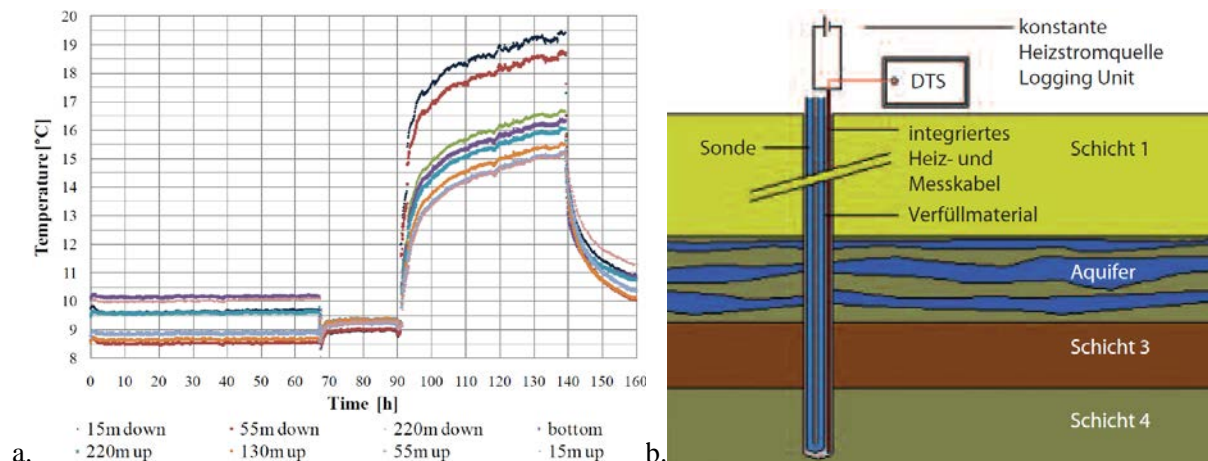
De aanwezigheid van grondwaterstroming rond een bodemwarmtewisselaar kan zowel een positief als negatief effect hebben op de prestaties van het bodemsysteem, afhankelijk van de toepassing (ISSO, 2005). Wanneer enkel warmte onttrokken (of toegevoerd) wordt, voert grondwaterstroming continue warmte aan (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.

3.2 Distributed TRT, Enhanced TRT en recuperatietest

De klassieke TRT zoals hiervoor besproken geeft een gemiddelde waarde van de warmtegeleidbaarheid over de volledige diepte van de warmtewisselaar. 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. Dit gebeurt door middel van temperatuurmetingen op verschillende dieptes in de warmtewisselaar gedurende de test. Beide tests maken gebruik van een Distributed Temperature Sensing (DTS) systeem, gebaseerd op de optische vezeltechniek. Deze techniek laat toe de temperatuur in de bodemwarmtewisselaar met hoge meetfrequentie op te meten op korte tussenafstanden (Fujii et al., 2006; Acuña et al., 2009; Katzenbach et al., 2007). Door de bodem vervolgens op te delen in zones kan voor elk deel de warmteuitwisseling tussen de bodemwarmtewisselaar en de grond geëvalueerd worden op basis van de temperatuurmetingen. De analyse wordt natuurlijk iets complexer.

Een Distributed TRT verschilt buiten de installatie van het DTS systeem in de bodemwarmtewisselaar en de aangepaste analyse niet van een gewone TRT. Acuña (2010) bespreekt de theoretische achtergrond bij de analyse van de proefdata.

De uitvoering van een Enhanced TRT wijkt al meer af van de klassieke TRT. Naast de optische vezel wordt ook een koperen kabel in de bodemwarmtewisselaar geïnstalleerd (). Deze koperen kabel wordt elektrisch opgewarmd door middel van een constante stroombron en functioneert zo over zijn gehele lengte als constante warmtebron (Warmte-Puls-Methode). In Heske et al. (2011) wordt de interpretatie van de test, die nog steeds steunt op de 'lijnbrontheorie' uitvoerig uit de doeken gedaan.



Figuur 5. (a) Vloeistoftemperaturen op verschillende dieptes tijdens een DTRT (Acuña and Palm, 2009). (b) Schematische voorstelling van de Enhanced TRT (Heske et al., 2011).

Een (goedkoper) alternatief is het uitvoeren van een recuperatietest. Hierbij worden na afloop van de TRT op verschillende tijdstippen temperatuurprofielen opgemeten in de bodemwarmtewisselaar (de circulatiepomp is dus niet in werking). Dit kan door na afloop van de klassieke TRT een temperatuursensor manueel neer te laten in de warmtewisselaar, waarbij de temperatuur op regelmatige tussenafstanden en verschillende tijdstippen wordt opgemeten. Uiteraard kan na afloop van een DTRT of ETRT ook een recuperatietest uitgevoerd worden met de aanwezige temperatuursensoren.

Door een verschil in recuperatiesnelheid (dit is de snelheid waarmee de temperatuur in de warmtewisselaar zich na de TRT terug stabiliseert met de ongestoorde bodemtemperatuur) tussen verschillende dieptes kunnen bijvoorbeeld watervoerende lagen waarin een significante grondwaterstroming aanwezig is, geïdentificeerd worden. Met behulp van meer geavanceerde analysetechnieken kan ook de warmtegeleidbaarheid in functie van de diepte bepaald worden.

4 Schatting gemiddelde thermische geleidbaarheid op basis van locatie

In het kader van het Smart-Geotherm project (www.smartgeotherm.be) is binnen het WTCB een rekenmodule in ontwikkeling die de gebruiker een idee geeft van de minimale en gemiddelde waarde van de gemiddelde thermische geleidbaarheid over de gewenste diepte. Deze tool werd gekalibreerd op basis van beschikbare TRT's over heel Vlaanderen. De methodologie wordt beschreven in de WTCB-nota 'Geschiktheidskaarten Geothermie – Thermische Geleidbaarheid Ondergrond Vlaanderen' opgesteld in het kader van het Smart-Geotherm project. Voor ondiepe toepassingen die zich hoofdzakelijk in quartaire lagen bevinden (<10m) is de schatting mogelijk minder nauwkeurig doordat het Quartair lokaal erg heterogeen kan zijn. Andere toepassingen zoals ThermoMap (<http://www.thermomap-project.eu>) zijn hiervoor mogelijk beter geschikt op dit moment.

Referenties

- 1) Acuña, J., 2010. Improvements of U-pipe borehole heat exchangers. Licentiate Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, Stockholm.
- 2) Acuña J., Palm, B., 2009. A comprehensive summary of borehole heat exchanger research at KTH. Conference on Sustainable Refrigeration and Heat Pump Technology, Stockholm.
- 3) 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.
- 4) Banks, D., 2008. An introduction to Thermogeology – Ground Source Heating and Cooling. Wiley-Blackwell.
- 5) 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).
- 6) 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, 2009, [VITO].
- 7) De Coster, 2010. Belgium geothermal potential : Where are the most interesting areas?
- 8) Fujii, H., Okubo, H., Itoi, R., 2006. Thermal Response Tests using Optical Fiber Thermometers. GRC Transactions, Vol. 30, 545-552.
- 9) Gehlin, S.E.A., Spitler, J.D., 2001. Thermal Response Test for BTES Applications – State of the Art 2001.
- 10) GSHPA, 2012. Thermal Pile System: Design, installation and materials standards. Consultations Issue, 18th June 2012.
- 11) GSHPA, 2011. Closed-loop Vertical Borehole: Design, installation and materials standards. Issue 1.0, September 2011.
- 12) Heidinger, P., Dornstädter, J., Steger, H., Zorn, R., Pröll, M., 2009. Enhanced Geothermal Response Test (EGRT): Erfahrungen aus der Praxis und Vergleiche mit dem ‘klassischen’ Thermal Response Test (TRT), Presentatie Symposium Göttingen, 16 September 2009.
- 13) Heske, C., Kohlsch, O., Dornstädter, J., Heidinger, P., 2011. Der Enhanced Geothermal Response Test als Auslegunggrundlage und Optimierungstool. Bbr-Sonderheft 2011 Oberflächennahe Geothermie, 36-43.
- 14) ISSO, 2005. ISSO 73: Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars, Rotterdam, maart 2005.
- 15) Katzenbach, R., Clauss, F., Waberseck, T., Wagner, I., 2007. Geothermal Site Investigation – Present Developments of the Geothermal Response Test. GRC Transactions, Vol. 31., 477-482.
- 16) Sanner, B., Mands, E., Sauer, M. K., Grundmann, E., 2008. Thermal response test, a routine method to determine thermal ground properties for GSHP design. 9th International IEA Heat pump conference, 20 – 22 May 2008, Zürich, Switzerland.
- 17) Sanner, B., Reuss, M., Mands, E. and Mueller, J., 2000, Thermal Response Test - Experiences in Germany. Proceedings of TERRASTOCK 2000, Stuttgart, 177-182.
- 18) VDI Richtlinien 4640, 2000. Thermal use of the ground. Fundamentals, approvals, environmental aspects. Verein Deutscher Ingenieure, Part 1, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- 19) Venkanna, B.K., 2010. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New Delhi: PHI Learning.
- 20) Witte, H.J.L., 2012. Error analysis of thermal response tests (Extended version). The 12th international conference on energy storage, Innostock 2012, 20p.
- 21) Witte, H.J.L., 2009. TRT: how to get the right number. GeoDrilling International, April 2009.

Bijlage A. Cijfervoorbeeld

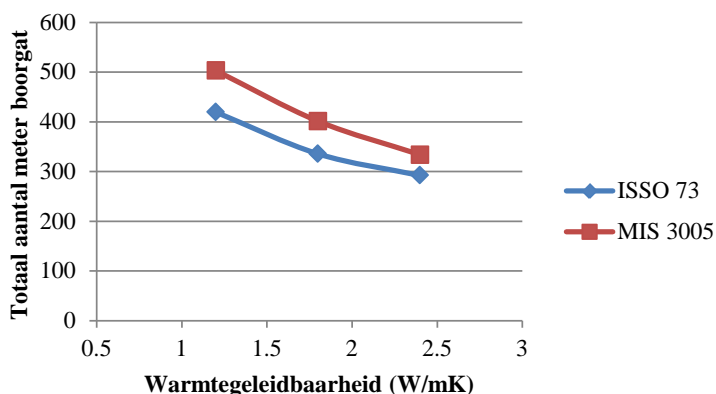
Om het belang van een goede inschatting van de warmtegeleidbaarheid van de ondergrond in de berekening van het totaal aantal meter boorgat te illustreren, wordt een realistisch cijfervoorbeeld uitgewerkt volgens twee verschillende rekenmethodieken: deze voorgesteld door de Nederlandse ISSO 73-publicatie ‘Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars’ en een tweede volgens de desbetreffende Microgeneration Certification Scheme Standard (MIS 3005).

Het rekenvoorbeeld gaat uit van een jaarlijkse warmtebehoefte van 24000 kWh. Het condensatorvermogen van de warmtepomp bedraagt 10kW. De COP van de warmtepomp is 3.5. Er wordt enkel warmte uit de grond onttrokken (0% recuperatie). De benodigde lengte aan verticale bodemwarmtewisselaars wordt berekend. Het gaat om een enkele U-lus (PE100, buitendiameter warmtewisselaar 32mm, diameter boorgat 130mm). De opvulling van het boorgat heeft een goede warmtegeleidbaarheid (>2.2 W/mK). Dit alles resulteert in een boorgatweerstand van 0.1 mK/W. De verticale bodemwarmtewisselaars worden opgesteld in een lijn met een minimale tussenafstand van 6m.

Tabel A.1 geeft een kort overzicht van de resultaten. De gedetailleerde uitwerking van dit rekenvoorbeeld volgens de twee normen is weergegeven in Tabellen 2 en 3. Beide methodieken geven duidelijk de invloed weer van de warmtegeleidbaarheid op de benodigde lengte aan verticale bodemwarmtewisselaars. Een halvering van de gemiddelde warmtegeleidbaarheid van 2.4 tot 1.2 W/mK betekent een toename van het benodigd aantal meter aan verticale bodemwarmtewisselaars van 40 tot 50%. De reden waarom de berekende lengte volgens MIS 3005 10 tot 20% hoger uitvalt dan de lengte volgens ISSO 73 valt buiten de scope van dit document.

Tabel A.1. Totaal benodigde lengte (m) aan verticale bodemwarmtewisselaars voor 3 verschillende waarden van de gemiddelde warmtegeleidbaarheid van de ondergrond berekend volgens de ISSO 73-publicatie en volgens de MIS 3005 standaard.

	Warmtegeleidbaarheid (W/mK)		
	1.2	1.8	2.4
ISSO 73	420	336	292
MIS 3005	504	402	334



Tabel 1. Gedetailleerde uitwerking rekenvoorbeeld volgens ISSO 73.

Q_WP-C	24000	kWh/jaar	Jaarlijkse warmtebehoefte			
P_WP-C	10	kW	Condensorvermogen WP			
t_eq-v	2400	u/jaar	Equivalente vollasturen			
COP_W	3.5	(-)				
f_COP-W	0.71	(-)	=1-1/COP_W - Omrekening van condensorwarmte en vermogen naar bodemwarmte en vermogen			
Q_bodem-W	17142.86	kWh/jaar	=f_COP-W*Q_WP-C			
P_bodem	7.14	kW	=f_COP-W*P_WP-C			
REG_aandeel	0.00	%	Aandeel recuperatie			
Specifieke piekvermogen	19.3	W/m	Specifieke piekvermogen per m boorgat bij 0% regeneratie en 2400 equivalente vollasturen			
L_tot(1)	371	m	=P_bodem*1000/Specifieke piekvermogen			
C_bodemsoort (2)	0.87	2.4W/mK	Type vraag A (0% regeneratie, FLEQ=1200hrs)			
	1	1.8W/mK	Type vraag A (0% regeneratie, FLEQ=1200hrs)			
	1.25	1.2W/mK	Type vraag A (0% regeneratie, FLEQ=1200hrs)			
C_vulmateriaal (3)	1	lambda = 2.2W/mK				
C_mediumtemperatuur (4)	1	Toelaatbare mediumtemperatuur > 0°C				
C_type_WW (5)	1	Enkele U-lus, geboord				
C_opstellingsvorm (6)	0.93	4 boringen op een rij				
C_onderlinge afstand (7)	0.975	6m tussenafstand, 0% regeneratie				
	L_tot(2)	L_tot(3)	L_tot(4)	L_tot(5)	L_tot(6)	L_tot(7) (m)
(lambda=2.4W/mK)	322	322	322	322	300	292
(lambda=1.8W/mK)	371	371	371	371	345	336
(lambda=1.2W/mK)	463	463	463	463	431	420

Tabel 2. Gedetailleerde uitwerking rekenvoorbeeld volgens MIS 3005.

Estimate of total heating energy consumption over a year for space heating and domestic hot water	24000	kWh/j			[1]	
HP heating capacity at 0°C ground return temperature and design emitter temperature, H	10	kW			[2]	
FLEQ run hours [1]/[2]	2400	uur			[3]	
Estimated average ground temperature	13	°C			[4]	
Estimated ground thermal conductivity	2.4	1.8	1.2	W/mK	[5]	
Maximum power to be extracted per unit length of borehole (chart/table)	42.8	35.6	28.4	W/m	[6]	2400 equivalente vollasturen -> table
Assumed heat pump SPF (from heat emitter guide)	3.5	3.5	3.5	(-)	[7]	
Maximum power extracted from the ground (i.e. heat pump evaporator capacity) $G = [2]*1000*(1-1/[7])$	7142.9	7142.9	7142.9	W	[8]	
Length of ground heat exchanger calculated using the look-up tables $L_b = [8]/[6]$	167	201	252	m	[9]	
Borehole spacing, d	6	6	6	m	[10]	
Total length of ground heat exchanger active elements, $L_p = [9]*R_{pt}$	334	402	504	m	[11]	$R_{pt}=2$ for boreholes
Total length of ground heat exchanger active elements installed in the ground, L_p'					[12]	(NB: state if proprietary software has been used to determine the design length)