



Vlaamse
Instelling voor
Technologisch
Onderzoek

Boeretang 200
B-2400 Mol, België
Tel.: + 32 14 33 55 11
Fax: + 32 14 33 55 99
vito@vito.be
www.vito.be

**DE WARMTEGELEIDBAARHEID VAN DE
VLAAMSE ONDIEPE ONDERGROND**
Meetcampagne uitgevoerd in het kader van ESIS

H. Hoes en B. Gysen

Vertrouwelijk

**DE WARMTEGELEIDBAARHEID VAN DE
VLAAMSE ONDIEPE ONDERGROND
Meetcampagne uitgevoerd in het kader van ESIS**

H. Hoes en B. Gysen

Studie uitgevoerd in het kader van het Strategisch Technologisch Onderzoek

2004/ETE/R/045

Vito

April 2004

Gedrukt op 20 exemplaren.

MANAGEMENTSAMENVATTING

Er zijn tot op heden reeds heel wat initiatieven genomen en technieken ontwikkeld in het streven naar en het stimuleren van het efficiënt gebruik van energie. Toch gaat nog steeds veel energie, en dan vooral thermische energie, verloren. Meestal is dit een gevolg van het niet samenvallen van vraag en aanbod. Met behulp van ondergrondse opslag van energie wordt hieraan een oplossing geboden. De bodem blijkt immers een prima opslagmedium voor zowel energie op hoge als op lage temperatuur zodat thermische energie voor langere tijd (seizoenale opslag) bewaard kan worden in de ondergrond. In het rapport "Hoge temperatuuropslag (HTO) in Vlaanderen, koppeling met de ondergrond" werden de mogelijkheden van deze techniek reeds aangehaald. Dit rapport werd uitgewerkt in het kader van de referentieopdracht van de Administratie van Natuurlijke Rijkdommen en Energie (ANRE) van de Vlaamse Gemeenschap aan het "Kenniscentrum Ondergrondse Energiebronnen" van Vito. Als belangrijk besluit werd in deze studie gesteld dat er nood was aan bijkomende en gedetailleerde informatie omtrent de warmtegeleidbaarheid van de Vlaamse ondiepe ondergrond. Deze studie geeft een overzicht van de resultaten van vijftien in-situ metingen in veel voorkomende dagzomende formaties in Vlaanderen.

Uit deze metingen blijkt dat een eenvoudige relatie tussen de lithologie en de thermische karakteristieken van een formatie niet te bepalen is. Meest opvallend zijn de hoge tot zeer hoge waarden voor de krijt- en mergelformaties (Maastricht en Heers). Verder valt op dat een aantal kleihoudende formaties hogere warmtegeleidbaarheden dan verwacht laten optekenen. De formatie van Boom (silthoudende klei) geeft hierbij eenzelfde geleidbaarheid dan de formatie van Brussel (middel-grove zanden), met $2,16 \text{ W/(mK)}$ voor beide formaties wordt het richtcijfer van $1,6 \text{ W/(mK)}$ voor Boom ruimschoots overschreden terwijl voor Brussel de literatuurwaarde hoger ligt ($2,5 \text{ W/(mK)}$). Een ander voorbeeld betreft de formatie van Gent, bestaande uit zandige-kleiige sedimenten, met $3,19 \text{ W/(mK)}$ wordt de richtwaarde van 2 W/(mK) belangrijk overtroffen.

Verder onderzoek werd verricht in het zoeken naar een verband tussen de geofysische en geotechnische kenmerken en de warmtegeleidbaarheid. Hieruit blijkt dat gegevens uit boorgatmetingen (resistiviteit, radioactiviteit, potentiaalverschil,...) niet bruikbaar zijn om te correleren naar de warmtegeleidbaarheid. Deze metingen zijn niet echt bruikbaar als gemiddelde waarde over een groot dieptetraject. Anderzijds zijn de voornaamste invloedsfactoren op de warmtegeleidbaarheid bepaald; het betreft grondwaterstand, grondwaterstroming, zand/klei-gehalte en sorteringsindex. Op basis van een empirisch bepaalde formule kan de plaatselijke warmtegeleidbaarheid ingeschat worden rekening houdend met deze factoren. Voor de meeste meetlocaties bekomt men alzo een aanvaardbare inschatting in vergelijking met de meetwaarden. Op deze manier kan afgestapt worden van het gebruik van richtcijfers die onderhevig zijn aan willekeur.

INHOUD

1	INLEIDING	3
2	NOODZAAK IN-SITU-TESTEN	4
3	LOCATIES	6
4	BESCHRIJVING THERMAL RESPONSE TEST	9
4.1	Installeren van de verticale warmtewisselaars	9
4.2	Meetwagen.....	11
4.3	Meetmethode	12
5	RESULTATEN.....	16
6	GEOTECHNISCHE EN GEOFYSISCHE PARAMETERS.....	24
7	BESLUIT	34

1 INLEIDING

In de beleidsbrief “Energie 2003” van Vlaams minister van Mobiliteit, Openbare Werken en Energie Steve Stevaert vindt men de strategische doelstellingen van het energiebeleid en de te bereiken effecten hiervan terug. De kerndoelen van het beleid van de minister worden in vier punten geresumeerd. Twee hiervan hebben rechtstreeks betrekking op het stimuleren van rationeel gebruik van energie (REG) met name met het oog op een vermindering van het energieverbruik in de residentiële sector in 2004 t.o.v. 1998 en op een toename van de energie-efficiëntie in de industrie en de dienstensector. Concreet heeft dit o.a. geleid tot actieplannen ‘REG in de huishoudens’ en ‘REG in de tertiaire sector’, opgenomen in het Vlaams Klimaatbeleidsplan dat principieel werd goedgekeurd door de Vlaamse regering op 28 juni 2002. Verder werd door de regering op 19 juli 2002 het instrument ‘Benchmarkingconvenant’ goedgekeurd voor bedrijven met als doel een vrijstelling van energietaks in ruil voor doorgedreven energie-efficiëntie.

In dit kader zijn er reeds langer initiatieven genomen en technieken ontwikkeld in het streven naar en het stimuleren van het efficiënt gebruik van energie. Toch gaat nog steeds veel energie, en dan vooral thermische energie, verloren. Meestal is dit een gevolg van het niet samenvallen van vraag en aanbod. Hierdoor gaat energie verloren die op andere tijdstippen wel nuttig kan aangewend worden. Met behulp van ondergrondse opslag van energie wordt hieraan een oplossing geboden. De bodem blijkt immers een prima opslagmedium voor zowel energie op hoge als op lage temperatuur zodat thermische energie voor langere tijd (seizoenale opslag) bewaard kan worden in de ondergrond. Tijdens periodes met een lage warmtevraag wordt de energie opgeslagen, tijdens periodes met grote warmtevraag wordt deze energie terug gerecupereerd. Er zijn hiervoor twee technieken beschikbaar: een open systeem dat gebruik maakt van (opgepompt en gereïnjecteerd) grondwater (koude-warmteopslag of KWO) en een gesloten systeem met verticale warmtewisselaars in de bodem (boorgat-energieopslag of BEO). De techniek van koude-warmteopslag werd reeds eerder door Vito met succes geïntroduceerd op de Vlaamse markt. Voornaamste beperking van deze techniek is de noodzaak tot beschikbaarheid van watervoerende lagen in de ondiepe ondergrond. Dit is vooral in het westen van het land een belangrijke beperkende factor voor de toepassing van de techniek.

Boorgat-energieopslag (BEO) kan in principe overall toegepast worden. In het rapport “Hoge temperatuuropslag (HTO) in Vlaanderen, koppeling met de ondergrond” werden de mogelijkheden van deze techniek reeds aangehaald. Dit rapport werd uitgewerkt in het kader van de referentieopdracht van de Administratie van Natuurlijke Rijkdommen en Energie (ANRE) van de Vlaamse Gemeenschap aan het “Kenniscentrum Ondergrondse Energiebronnen” van Vito. Als belangrijk besluit werd in deze studie gesteld dat er nood was aan bijkomende en gedetailleerde informatie omtrent de warmtegeleidbaarheid van de Vlaamse ondiepe ondergrond. Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van de uitgangspunten voor het opzetten van de meetcampagne. In hoofdstuk 3 wordt een overzicht van de meetplaatsen gegeven terwijl hoofdstuk 4 handelt over de thermische geleidbaarheidsmetingen. Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de bekomen resultaten. In hoofdstuk 6 wordt naar een verband gezocht tussen enkele geotechnische en geofysische parameters en de thermische karakteristieken van de geologische formaties.

2 NOODZAAK IN-SITU-TESTEN

De interesse naar de thermische eigenschappen van de ondiepe ondergrond dateert van bij de opkomst van de eerste warmtepompen in de jaren zeventig tijdens de oliecrisis. De voornaamste parameters zijn de warmtegeleidbaarheidscoëfficiënt (λ -waarde uitgedrukt in $W/(mK)$), de opslagcapaciteit (uitgedrukt in $MJ/(m^3K)$) en de boorgatweerstand (uitgedrukt in $K/(W/m)$). Bij installatie-ontwerpen werden en worden nog steeds deze parameters ingeschat op basis van enkele eerder vage richtwaarden die afhankelijk van de bron zeer uiteenlopend kunnen zijn. Zo schommelt de warmtegeleidbaarheidscoëfficiënt λ van zandgrond tussen 0,4 en 5 $W/(mK)$. Een verdere detaillering bestond erin om het watergehalte van de bodem in rekening te brengen. Zo zal een waterverzadigde zandbodem een λ -waarde geven tussen 1,7 en 5 $W/(mK)$ met als richtwaarde 2,4 $W/(mK)$. Plaatselijke afwijkingen op deze richtwaarden worden gerechtvaardigd door bv. grote grondwaterstromingen of granulometrische en lithologische verschillen, zodat de richtwaarde zeker niet als algemeen toepasbaar kan aanzien worden. De invloed van de λ -waarde op het installatie-ontwerp is zeker niet te verwaarlozen. Zo zal het aantal en de diepte van de boorgaten belangrijk verschillen bij een kleibodem vergeleken met een zandbodem. Een optimalisatie van het ontwerp (met belangrijke invloed op de prijs en de kwaliteit van de installatie) is dan ook onmogelijk zonder detailgegevens aangaande de thermische eigenschappen van de bodem.

In de eerder vermelde studie 'HTO in Vlaanderen, koppeling met de ondergrond' werd reeds een oplijsting gemaakt van de huidig voorhande zijnde gegevens vooral aangaande de warmtegeleidbaarheidscoëfficiënt λ . Hierin werd reeds zoveel mogelijk rekening gehouden met de lithologische verschillen tussen de verschillende dagzomende formaties en met de aanwezigheid van grondwater. Dit resulteerde in een eerste aanzet om de parameter in kaart te brengen in Vlaanderen, voorgesteld in figuur 2.1. Deze kaart geeft ruwweg een indicatie van de grootte-orde van de warmtegeleidingscoëfficiënt. De kaart had echter zeker niet de intentie om een gedetailleerd beeld te geven doordat de waardes gebaseerd zijn op gemiddelde waardes, belangrijke afwijkingen hierop zijn zeker mogelijk.



Figuur 2.1 : kaart van de λ -waarde van de ondiepe ondergrond in Vlaanderen

De wijze waarop de λ -waarde in het verleden bepaald werd kan mede de oorzaak zijn van de grote verschillen in de literatuur. Dikwijls werden deze immers bekomen door middel van laboratoriumtesten. Hierbij werd de warmtedoorgang gemeten doorheen een specifiek grondstaal wat natuurlijk zijn beperkingen heeft. In laboratoriumomstandigheden is het niet altijd mogelijk om de werkelijke toestand na te bootsen. Er dient namelijk rekening gehouden te worden met een veelheid aan invloedsfactoren zoals grondwaterstand, grondwaterstroming, omgevingstemperatuur, convectiestromen, ...

De beste manier om de warmtegeleidbaarheidscoefficiënt te meten, is de meting van de warmtegeleidbaarheid ter plaatse in de bodem zelf. In 1995 werden tegelijkertijd in Zweden (Eklöf & Gehlin) en in USA (Austin) een in-situ test ontwikkeld die de warmtegeleidbaarheid en de boorgatweerstand kan bepalen, de zogenaamde "thermal response test". Bij de uitvoering van deze test wordt een gesloten circuit gecreëerd met de verticale warmtewisselaar, een circulatiepomp en een verwarmingselement. Op die manier wordt een constante hoeveelheid warmte in de bodem gebracht, de evolutie van de parameters (debiet en temperatuur) laten toe om een berekening te maken van de λ -waarde. Een gedetailleerde beschrijving van de meetmethode volgt in hoofdstuk 4.

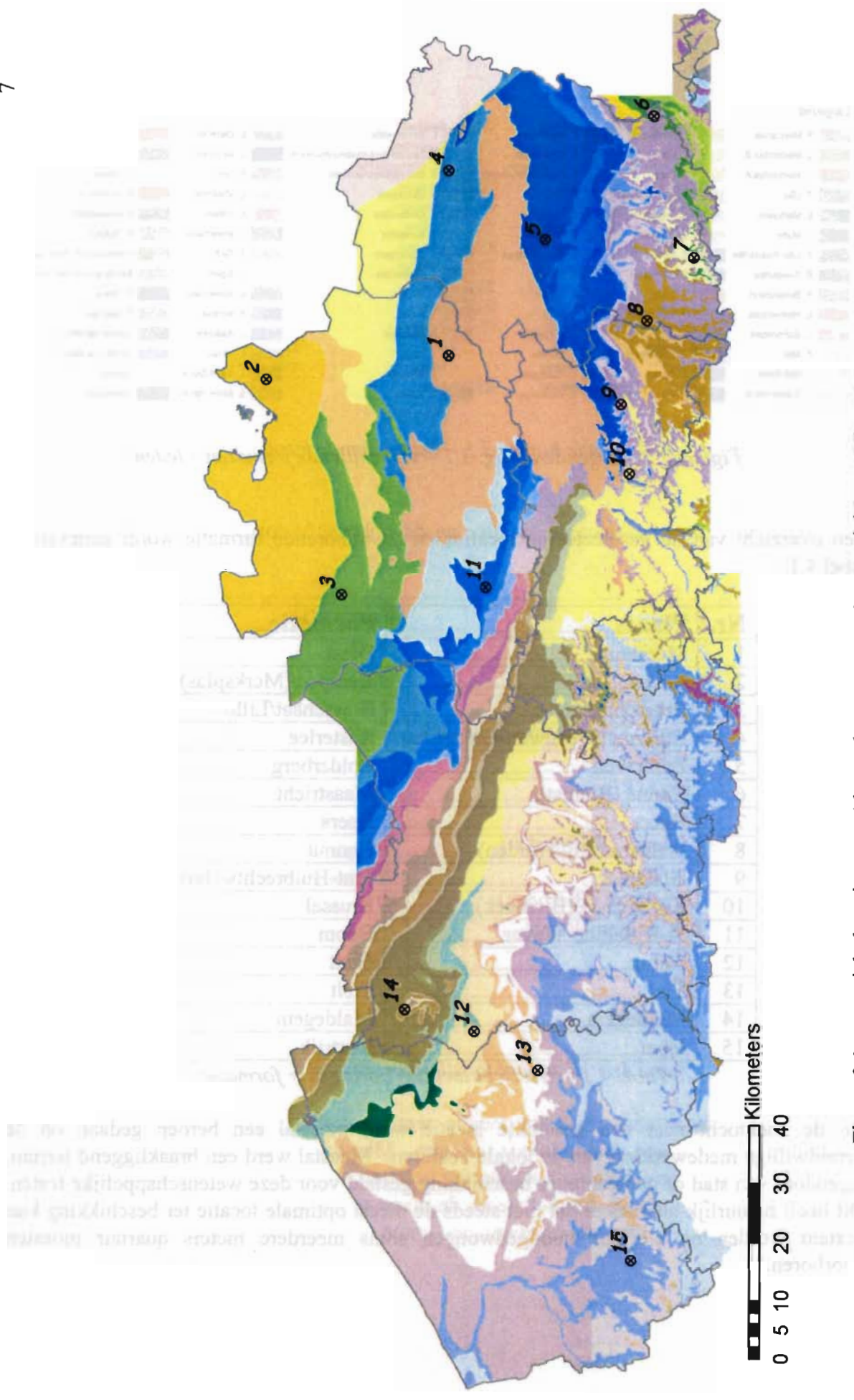
De thermal response test wordt ondertussen erkend als de beste manier om de λ -waarde te bepalen. Testwagens zijn ondertussen ontwikkeld/in gebruik in Zweden, Noorwegen, Duitsland, Engeland, Nederland, USA, Canada, Zwitserland en Turkije. Momenteel is in het kader van het IEA IA ECES, annex 13 (design, construction and maintenance of UTES wells and boreholes) een state of the art report over Thermal Response Test for BTES Applications geschreven, doch dit dient nog goedgekeurd te worden door de ExCo (mei 2003). Omwille van de relatief hoge kostprijs is het niet opportuun om voor elk warmtepompproject een dergelijke test uit te voeren. Nochtans is het de beste manier om te komen tot een optimaal ontwerp. Vito heeft in 2002 in het kader van strategisch onderzoek 15 testen uitgevoerd op zorgvuldig geselecteerde plaatsen. Met de hieruit verkregen informatie moet het mogelijk zijn om een betere inschatting te maken van de λ -waarde voor het grootste gedeelte van Vlaanderen. Warmtepomp- en energieopslagprojecten zullen dan ook in de toekomst met meer zorg ontworpen en geoptimaliseerd kunnen worden.

3 LOCATIES

Op basis van de beschikbare geologische kaarten en boorbeschrijvingen werden 15 locaties weerhouden voor de uitvoering van een thermal response test. De locatie diende aan een aantal criteria te voldoen om geselecteerd te worden. Belangrijkste voorwaarde was de aanwezigheid van een voldoende dik pakket (minimaal 20 m) van één en dezelfde formatie. Om een goede meting te kunnen realiseren is het immers aangewezen dat een warmtewisselaar van minimaal 20 m lengte wordt aangebracht. Door de warmtewisselaar aan te brengen in slechts één welgekende formatie kunnen we gericht de thermische eigenschappen van deze formatie bepalen. Er is dan sprake van één homogeen pakket waarin de warmtewisseling plaats heeft. Uiteraard dient de te onderzoeken formatie te dagzomen (aan de oppervlakte te komen) zodat de warmtewisselaar volledig in de betrokken formatie terecht komt. Verder is het noodzakelijk dat de gekozen formatie voldoende frequent voorkomt in de Vlaamse ondiepe ondergrond zodat er sprake is van een voldoende relevantie van onderzoek naar de formatie in het kader van toekomstige energieopslag- of warmtepompprojecten.

In een zoektocht naar de verschillende formaties is tevens rekening gehouden met de dikte van de quartaire afzettingen. Dit zijn de laatste afzettingen (laatste 1,8 miljoen jaar) die als een meestal dunne mantel de vroegere, oudere formaties (uit het tertiair) bedekken. Op de meeste plaatsen is de dikte van de afzettingen beperkt (enkele meters dik), op sommige plaatsen kan dit echter oplopen tot meer dan 25 m. Om de invloed van het quartair op de metingen te beperken, is getracht om de doorgang van de verticale warmtewisselaar doorheen het quartair te isoleren. Voor de isolatie wordt gebruik gemaakt van Armaflex[®] (synthetisch schuimrubber met uitstekende isolerende en vochtbestendige eigenschappen).

Voor de uitvoering van geleidbaarheidstesten zijn dus vooral de eerste vijftig meter onder het maaiveld van belang. De invloed van de jongste afzettingen (quartair) worden op bovenvermelde wijze geminimaliseerd daar we ons focussen op de tertiaire afzettingen. Dit zijn de afzettingen die in de chronostratigrafie gecatalogeerd zijn onder neogeen (plioceen, mioceen) en paleogeen (oligoceen, eoceen en paleoceen). De verschillende tertiaire formaties en locaties, dewelke aan een thermal response test onderworpen zijn, zijn weergegeven in figuur 3.1 en figuur 3.2 (legende). De 15 locaties zijn zodanig gekozen dat de formaties die ze vertegenwoordigen een belangrijk deel van Vlaanderen bedekken. De eigenlijke tertiaire formaties worden aangeduid met een F. Soms worden de formaties nog onderverdeeld in de zogenaamde leden (aangeduid met L.) die op de kaart allen in kleurvariant van de basisformatie zijn aangegeven. Deze onderverdeling laat toe om binnen een formatie nog verdere opdelingen toe te laten om (meestal) kleinere lithostratigrafische verschillen aan te geven. Meestal zullen de verschillende leden eenzelfde λ -waarde opleveren, in sommige gevallen kunnen de leden wel belangrijk verschillen van samenstelling zodat een opsplitsing van de λ -waarde wenselijk is.



Figuur 3.1 : overzicht locaties voor 'thermal response test' op tertiairkaart Vlaanderen



Figuur 3.2 : Legende bij fig. 3.1 – verschillende formaties - leden

Een overzicht van de geselecteerde locaties en de bijhorende formatie wordt gegeven in tabel 4.1.

Nr.	Plaats	Formatie
1	Meerhout	Diest
2	Ravels	Kempen (Merksplas)
3	Brasschaat	Brasschaat/Lillo
4	Ellikom (Meeuwen-Gruitrode)	Kasterlee
5	Zonhoven	Bolderberg
6	Kanne (Riemst)	Maastricht
7	Heers	Heers
8	Wilderen (St-Truiden)	Hannut
9	Glabbeek	Sint-Huibrechts-Hern
10	Korbeek-lo (Bierbeek)	Brussel
11	St-Katelijne-Waver	Boom
12	Aalter	Gent
13	Tielt	Tielt
14	Maldegem	Maldegem
15	Ieper	Kortrijk

Tabel 4.1 : overzicht locaties boringen + formatie

Bij de zoektocht naar een geschikte locatie werd meestal een beroep gedaan op de bereidwillige medewerking van de lokale besturen. Meestal werd een braakliggend terrein, eigendom van stad of gemeente ter beschikking gesteld voor deze wetenschappelijke testen. Dit heeft natuurlijk als nadeel dat niet steeds de meest optimale locatie ter beschikking kon gesteld worden en we dus noodgedwongen soms meerdere meters quartair moesten doorboren.

4. BESCHRIJVING THERMAL RESPONSE TEST

4.1 Installeren van de verticale warmtewisselaars

Vooraleer de eigenlijke thermal response test te kunnen starten is het nodig om een verticale warmtewisselaar aan te brengen op de voorziene locatie. Hiertoe werd een boring uitgevoerd met een (zo klein mogelijke) diameter die toelaat om de verticale warmtewisselaar makkelijk in te kunnen brengen. Een zo klein mogelijke diameter is wenselijk om enerzijds de ondergrondse verstoring te minimaliseren en de warmtewisselaar zo kort mogelijk bij de boorgatwand te brengen en anderzijds om de hoeveelheid opvulmateriaal te beperken. In de meeste gevallen is de boring uitgevoerd met een spoelboring (diameter 160 mm) en bedraagt de boordiepte 30m (zie fig. 4.1).



Figuur 4.1 : spoelboring te Maldegem

Bij een spoelboring wordt een roterende boorkopbeweging gecombineerd met watertransport voor de afvoer van de materie waarbij water centraal door de holle boorstangen wordt toegevoerd en langs de stangen heen terug naar boven wordt gebracht. Na het uitbrengen van de boorstangen (het boorgat blijft door overdruk uit zichzelf openstaan) wordt zo snel mogelijk de eigenlijke warmtewisselaar ingebracht. De warmtewisselaars zijn U-vormig (diameter 150mm), gemaakt uit PE (polyethyleen) en ze zijn 30m lang (zie figuur 4.2). De buizen worden gevuld met water en onderaan de lus wordt een extra gewicht bevestigd om het inbrengen te vergemakkelijken (in dit geval een PVC-buis gevuld met grind). Om de 1,5 meter wordt een afstandshouder aangebracht om te vermijden dat de twee benen van de warmtewisselaarlus elkaar raken en om de buizen zo dicht mogelijk bij de boorwand te brengen.



Figuur 4.2 : verticale warmtewisselaar

Na het inbrengen van de warmtewisselaars wordt het boorgat terug opgevuld. Bij een zanderige ondergrond werd het oorspronkelijke zand terug ingebracht, eventueel aangevuld met gewoon reinzand om de zandverliezen te compenseren. Bij een kleiige ondergrond of een mergel/krijt bodem werd een klei-bentoniet-mengsel ingebracht. Het is hierbij de bedoeling om bij goed geleidende, waterverzadigde bodems zoveel mogelijk de oorspronkelijke toestand te herstellen. Bij kleibodems wordt de boorgatweerstand gereduceerd met behulp van bentoniet.

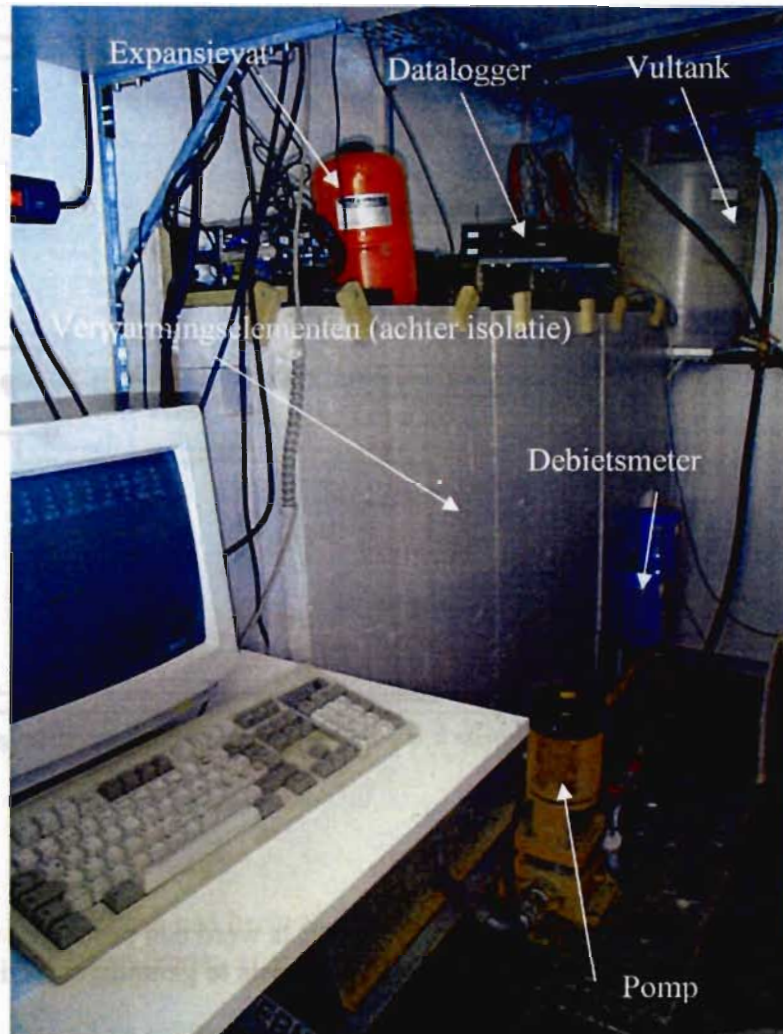
Bij uitzondering werd op twee locaties de boormethode aangepast aan de specifieke situatie van de ondergrond. Dit was het geval in Kanne en in Heers, waar geboord werd in respectievelijk de formatie van Maastricht (krijt) en de formatie van Heers (Mergels van Gelinden). Typisch voor deze formaties is de aanwezigheid van silexbanken (vuursteen), een bijzonder hard gesteente. In deze gevallen werd de hamerslagmethode met luchtdruk toegepast.

Vooraleer de eigenlijke test uit te voeren werd een rustperiode van minimaal drie weken gerespecteerd opdat de materie rond het boorgat terug in zijn oorspronkelijke toestand kan

komen (oorspronkelijke temperatuur,...). Tevens moet ook de boorgatvulling tijd krijgen om te compacteren.

4.2 Meetwagen

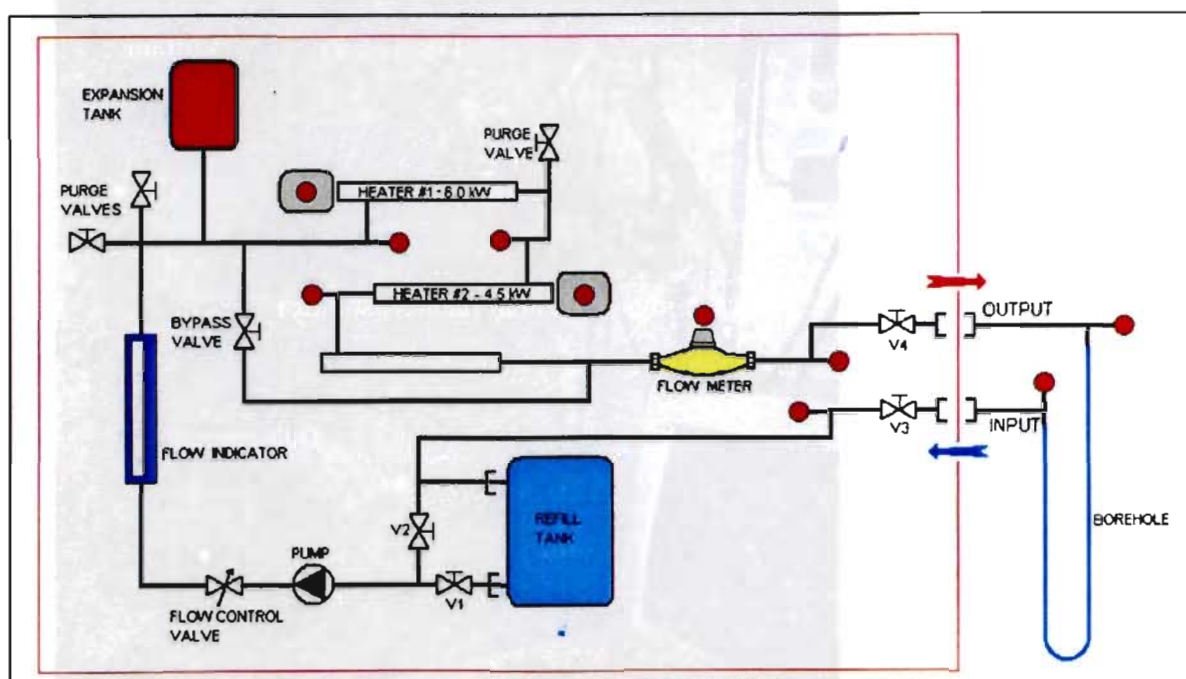
De warmtegeleidbaarheidsmetingen (thermal response tests) werden uitgevoerd met behulp van een meetwagen die ter beschikking werd gesteld door Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung (ZAE). ZAE heeft een eigen meetsysteem ontwikkeld waarbij alle apparatuur in een gesloten aanhangwagen gemonteerd werd (zie figuur 4.3).



Figuur 4.3 : meetmobiel met hydraulisch circuit + loggingsapparatuur

De opstelling bestaat uit een hydraulisch circuit en een dataloggingssysteem. Een voorstelling van het hydraulisch circuit is gegeven op figuur 4.4. Het bestaat uit een pomp, een debietsregelaar en -meter, enkele elektrische verwarmingselementen en randapparatuur (vultank, expansievat, ontluchtingsventielen, bypassklep). De vertrek- en retourleiding van het circuit worden naar buiten gebracht ter aansluiting van de verticale warmtewisselaar. De verschillende meetsignalen worden verwerkt door de datalogger. Deze is op zijn beurt gekoppeld met een PC, waar de signalen gevisualiseerd worden (update per minuut). Deze waarden worden per dag door de PC weggeschreven (1440 waarden per parameter). De belangrijkste metingen in het hydraulisch circuit zijn aangegeven op figuur 4.4 met een rood

punt. Daarnaast wordt de binnen- en de buitentemperatuur gemeten en gelogd. De elektrische voeding kan van buitenaf aangekoppeld worden, de aansluiting werd aangepast zodat deze zowel één- als driefasig verwezenlijkt kan worden. In de trailer is een elektriciteitskast aangebracht voorzien van beveiligingsapparatuur (automaten en verliesstromschakelaar). De (driefasige) pomp werd omgebouwd om toe te laten zowel een driefasige als éénfasige aansluiting (met aanloopcondensator) te verwezenlijken. Verder is er een UPS (uninterruptable power supply) voorzien om de spanning te stabiliseren. Deze zorgt ervoor dat het afgegeven vermogen (door de elektrische verwarmingselementen) constant blijft.



Figuur 4.4 : hydraulisch circuit meettrailer

4.3 Meetmethode

Voor de uitvoering van thermal response tests werd een procedure opgesteld om een uniforme en betrouwbare uitvoering van de tests te garanderen. Dit resulteerde in een 20-stappen-plan :

1. sluit de voedingskabel aan
2. sluit kleppen V1, V3 en V4
3. controleer het waterniveau van de vultank (vul eventueel bij)
4. sluit in- en output (zie fig. 4.4) kort via de snelkoppelingsslangen (met ingebouwde temperatuursensor)
5. open kleppen V2, V3, V4, bypass, ontluchttingsventielen en als laatste V1;
6. sluit de ontluchttingsventielen van zodra deze water spuien, het hydraulisch circuit is dan watergevuld
7. bepaal het debiet, nodig om een temperatuursverschil over aanvoer en retour te verkrijgen van ongeveer 5K (controleer of dit debiet een turbulente stroming

creëert, anders dient het debiet verhoogt te worden) en bij inbreng van 50 W/m boorgatdiepte warmte.

=> bij dit project : 30 m boorgatdiepte ; warmtewisselaar 25 x 2,3 mm

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T = 1,5 \text{ kW}$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{1,5}{4190,5} = 71,6 \text{ ml/s}$$

$$v = \frac{\dot{m}}{A} = 0,22 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l_k}{\eta} = \frac{\rho \cdot v \cdot d_i}{\eta} = \frac{1000 \cdot 0,22 \cdot 0,0204}{0,001} = 4467$$

Bij Reynoldsgetallen (Re) boven 2500 komt men in het gebied van de turbulente stroming. Er is echter een overgangszone en om zeker ten allen tijde in het turbulente gebied te vertoeven, werd het debiet opgevoerd tot 95 ml/s (Re = 6000) - ΔT wordt 4 !

8. bepaal de noodzakelijke tijd die nodig is om al het water uit de ondergrondse U-lus te verplaatsen gebruikmakende van bovenstaand debiet en buisafmetingen

=> bij dit project : t = 3,5 min

9. schakel de pomp in en regel het debiet naar de berekende waarde (= 95 ml/s of 0,34 m³/h) – schakel nadien pomp weer uit
10. sluit kleppen V2, V3, V4, bypass en koppel de hydraulische slangen af
11. zet de PC en het monitoring-systeem aan
12. koppel de hydraulische slangen aan de verticale warmtewisselaar en open kleppen V3 en V4
13. schakel de pomp terug in, minstens voor een tijdsbestek zoals berekend in 8. (in dit geval minimaal 3,5 minuten)
14. controleer het hydraulisch circuit op eventuele lekken en ontlucht
15. open klep V2
16. schakel de pomp uit
17. plaats thermische isolatie rondom de buizen in contact met de buitenomgeving + aluminiumfolie (ter weerkaatsing direct zonlicht) en noppenfolie (bescherming aluminiumfolie) (zie figuur 4.5)
18. bedek het hydraulisch binnencircuit met isolatiepanelen
19. registreer de meterstanden van de verschillende elektriciteitsmeters
20. schakel pomp en verwarmingselementen (1,5 kW) aan



Figuur 4.5 : thermal response test in Kanne (Riemst)

De uitvoering van de test dient continu en minimaal 48 uur te verlopen. Tijdens deze periode blijft de pomp aan een constant debiet water circuleren en ook het verwarmingsvermogen blijft ingeschakeld. Door het toevoeren van een constant vermogen aan een vast debiet zal er ook een constant temperatuurverschil tussen de vertrek- en retourleiding zijn. In de onmiddellijke omgeving van de warmtewisselaar zal de temperatuur echter stijgen, zodat de globale temperatuur van het water wel zal stijgen (vb. in begin temperaturen vertrek/retour = 18/14 ; na 48 uur vertrek/retour = 28/24). Het is de curve van deze temperatuurstijging die belangrijk is voor de bepaling van de λ -waarde. Deze warmtegeleidingscoëfficiënt of λ -waarde (uitgedrukt in W/(mK)) is niet de enige thermische karakteristiek die van belang is voor het ontwerp van een ondergronds opslagsysteem met verticale warmtewisselaars. Tevens van belang is de volumetrische warmtecapaciteit of C-waarde (uitgedrukt in MJ/(m³K)) die een indicatie geeft van de hoeveelheid warmte die kan opgenomen worden per volume- en temperatuureenheid. Deze waarde is vooral functie van de waterinhoud en minder van het ondergrondtype en is voor waterverzadigd zand-, klei- en siltgronden gelegen tussen 2,2 en 2,5 MJ/(m³K). Vergeleken met water als opslagmedium voor warmte betekent dit dat 1 m³ waterverzadigd zand, silt of klei evenveel warmte kan opslaan als 0,55...0,6 m³ water. Verder is ook de boorgatweerstand R_b (uitgedrukt in K/(W/m)) van invloed op het ontwerp van een ondergronds opslagsysteem. Terwijl de C-waarde een indicatie geeft van het buffervermogen van de bodem, zal de R_b -waarde vooral een invloed hebben op het ogenblikkelijk haalbare vermogen aangaande warmte-onttrekking of -injectie. Deze factor geeft aan hoe vlot de warmte-overdracht

tussen het fluïdum in de verticale warmtewisselaar en de boorgatwand verloopt. Er wordt steeds gestreefd naar een zo laag mogelijke Rb-waarde.

RESULTATEN

Plaats	Diepte booring (m)	Diepte booring (m)	Temperatuur (W/mK)
Alster	2	30	3,19
Tiel	4	30	2,11
Maldegem	0	10	2,14
legt	0	30	1,62
Middelbeem	0	23	2,16
Bierbeek	0	30	2,16
Clabbeek	4	30	2,22
St-Tandem	2	29	2,1
Heer	7	29	4
Heer	8	20	67
Bassendreef	4	30	2,89
Kavels	0	10	2,70
Zandvoeren	3	30	2,91
Ellikom	10	30	2,31
Meerbeek	0	30	2,98

Formule van Dietz-Meethof

De formule van Dietz bestaat uit geometrische half grove tot grove zand. Geïmponeerd is een concreet kleimateriaal dat evenwel vrij veel ijzer bevat. De formule van Dietz is ter hoogte van Meerbeek waterverzadigd met een grondwaterpeil van ongeveer -5m. De grondwateromgeving is laag.

5. RESULTATEN

Formatie	Plaats	Isolatie (m)	Diepte boring (m)	λ_{gemeten} (W/mK)	$R_{b_{\text{gemeten}}}$ (K/(W/m))
Diest	Meerhout	0	30	2,96	0,22
Kasterlee	Ellikom	10	30	2,31	0,22
Bolderberg	Zonhoven	2	30	2,91	0,15
Kempen	Ravels	0	30	2,70	0,17
Brasschaat	Brasschaat	4	30	2,89	0,14
Maastricht	Riemst	8	30	67	0,12
Heers	Heers	7	29	4	0,16
Hannut	St-Truiden	2	29	2,1	0,2
St-Huibrechts-Hern	Glabbeek	4	30	2,58	0,16
Brussel	Bierbeek	0	30	2,16	0,22
Boom	Mechelen	0	23	2,16	0,2
Kortrijk	Ieper	0	30	1,62	0,26
Maldegem	Maldegem	0	30	2,14	0,28
Tielt	Tielt	4	30	2,11	0,16
Gent	Aalter	5	29	3,19	0,13

Elke boring zal kort samengevat worden. Per locatie wordt eerst een algemene lithologische omschrijving gegeven zoals weergegeven in de verschillende “toelichtingen bij de geologische kaarten van België”. Vervolgens wordt dit, indien mogelijk/duidelijk, gekoppeld met de lokale omstandigheden. Op basis van de beschrijving wordt een richtwaarde voor de warmtegeleidbaarheid zoals terug te vinden in de literatuur weergegeven. Tevens wordt een indicatieve grondwaterstand weergegeven en een vermelding van isolatie.

Tenslotte zal het resultaat van de test worden vermeld.

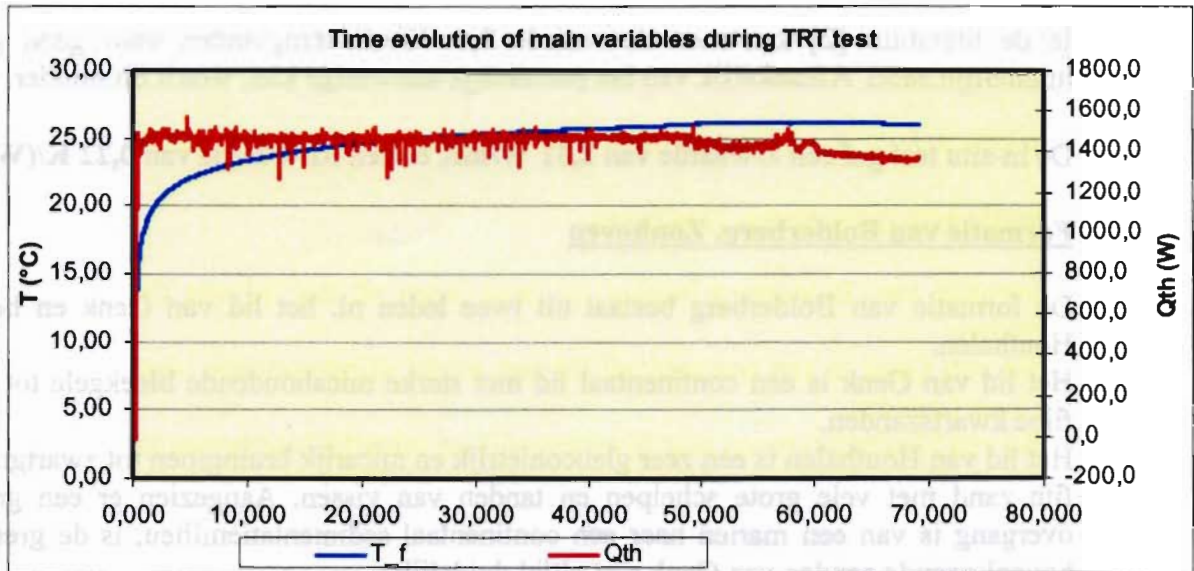
Formatie van Diest, Meerhout

De formatie van Diest bestaat uit glauconietrijke half grove tot grove zanden. Glauconiet is een donkergroen kleimineraal dat evenwel vrij veel ijzer bevat. De formatie van Diest is ter hoogte van Meerhout waterverzadigd met een grondwaterpeil van ongeveer -2m. De grondwaterstroming is laag.

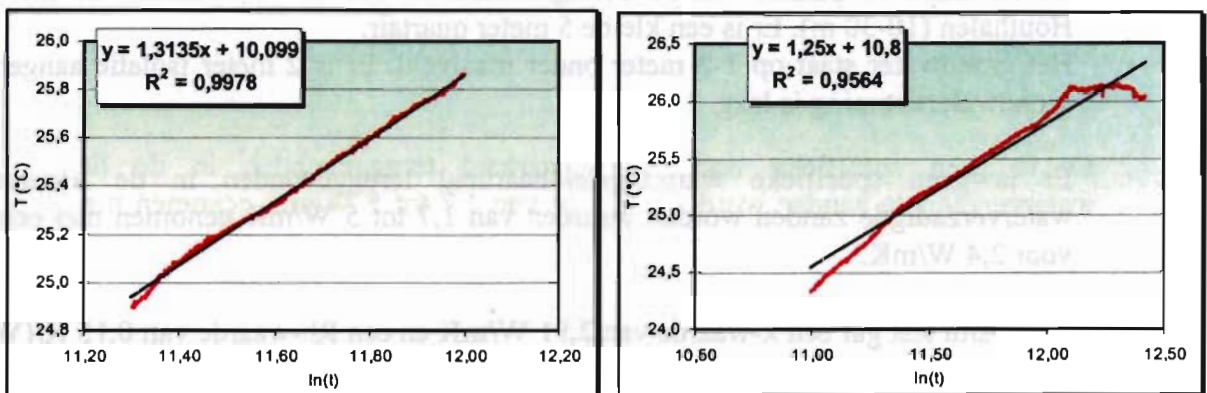
Een specifieke bemeting op laboschaal van de formatie van Diest gaf een resultaat van 1,71 – 1.59 W/mK [1]. Deze lagere waarden kunnen hun oorzaak vinden in het niet waterverzadigd zijn. Hierdoor zakt de geleidbaarheid (volgens [2] schommelen de waarde voor grof redelijk ongesorteerd zand van 0,6 bij 0% saturatie tot 3,3 bij 100% saturatie). In de literatuur zijn waarden voor waterverzadigde zanden terug te vinden tussen 1,7 en 5 W/mK met een voorkeur voor 2,4 W/mK.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,96 W/mK** en een R_b -waarde van **0,22 K/(W/m)**.

Als voorbeeld zijn hier enkele grafieken weergegeven. Figuur 5.1 geeft het temperatuursverloop en het ingebrachte vermogen weer gedurende de test.



Figuur 5.1: temperatuur en toegevoerd vermogen ivf tijd



Figuur 5.2: temperatuur versus $\ln(t)$ met bepaling van de richtingscoëfficiënt

Figuur 5.2 geeft twee grafieken met verschillende tijdsintervallen weer. Door lineaire regressie wordt de richtingscoëfficiënt bepaald. Uit deze richtingscoëfficiënt kan dan (via de line source theorie) de warmtegeleidbaarheid worden afgeleid. De linkse grafiek geeft een λ van 2,93 en de rechtse grafiek 3,08. Meerdere grafieken worden gemaakt met resulterend een gemiddelde waarde van 2,96 W/mK.

Formatie van Kasterlee, Ellikom

Bleekgroene tot bruine kleihoudende fijne zanden (met soms echte kleilenzen). Licht glauconiethoudend. Vrij goed gesorteerd. De boven- en ondergrenzen bevatten vaak kenmerken van de aangrenzende formaties.

Ter hoogte van de boring bleek een quartaire laag van 10 meter aanwezig te zijn. Er is dan ook 10 meter isolatie aangebracht rond de verticale warmtewisselaars.

Het grondwaterpeil zit ongeveer op 2-3 meter onder maaiveld. De grondwaterstroming is laag.

In de literatuur [2] kan men de waarde 2,4 W/mK terugvinden voor goed gesorteerd middelfijn zand. Afhankelijk van het percentage aanwezige klei, wordt dit minder.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,31 W/mK** en een Rb-waarde van **0,22 K/(W/m)**.

Formatie van Bolderberg, Zonhoven

De formatie van Bolderberg bestaat uit twee leden nl. het lid van Genk en het lid van Houthalen.

Het lid van Genk is een continentaal lid met sterke micahoudende bleekgele tot grijswitte fijne kwartszanden.

Het lid van Houthalen is een zeer glauconietrijk en micarijk bruingroen tot zwartgroen kleilig fijn zand met vele grote schelpen en tanden van vissen. Aangezien er een geleidelijke overgang is van een marien naar een continentaal sedimentatiemilieu, is de grens met de bovenliggende zanden van Genk niet altijd duidelijk.

De Formatie ter plaatse van de boring bestaat uit het lid van Genk (5-10 m) en lid van Houthalen (10-30 m). Er is een kleine 5 meter quartair.

Het grondwater staat op 1-2 meter onder maaiveld. Er is 2 meter isolatie aangebracht. De grondwaterstroming is laag.

Er is geen specifieke warmtegeleidbaarheid teruggevonden in de literatuur. Voor waterverzadigde zanden worden waarden van 1,7 tot 5 W/mK genomen met een voorkeur voor 2,4 W/mK.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,91 W/mK** en een Rb-waarde van **0,15 K/(W/m)**.

Formatie van de Kempen, Ravels

Ongeveer 4 meter quartair gevolgd door de formatie van de Kempen. De formatie van de Kempen bestaat uit verschillende kleilagen die elkaar opvolgen of onderbroken worden door zandlagen.

Ter plaatse van de boring kwamen geen uitgesproken kleilagen voor doch meer kleilig zand (overheersende zandfracties).

Het grondwater bevindt zich op 2 meter onder maaiveld. De grondwaterstroming is laag. Er is geen isolatie aangebracht.

Wanneer er zuivere kleilagen zouden voorkomen, vindt men in de literatuur waarden terug van 0,9 tot 2,3 W/mK met een voorkeur voor 1,6 W/mK. Aangezien we hier geen klei maar meer overheersende zandfracties hebben zou de warmtegeleidbaarheid meer richting waterverzadigde zanden moeten gaan (1,7 tot 5 W/mK).

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,70 W/mK** en een Rb-waarde van **0,17 K/(W/m)**.

Formatie van Brasschaat/Lillo, Brasschaat

De zanden van Brasschaat bestaan uit bleekgrijze zanden, meestal neigend naar grof zand. De formatie ligt op de zanden van Lillo die bestaan uit groene tot grijsbruine licht glauconiethoudende fijne tot middelmatige zanden. Deze formatie bevat schelpenresten. Ter hoogte van deze boring was er 4 meter quartair gevolgd door de formatie van Brasschaat tot 12 meter. Van 12-30 meter was er de formatie van Lillo.

De waterstand bedraagt ongeveer 2 meter onder maaiveld. De grondwaterstroming is laag. Er is 4 meter isolatie aangebracht.

Voor waterverzadigde zanden worden waarden van 1,7 tot 5 W/mK genomen met een voorkeur voor 2,4 W/mK.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,89 W/mK** en een Rb-waarde van **0,14 K/(W/m)**.

Formatie van Maastricht, Riemst

Deze formatie bestaat uit grof geel en wit kalkareniet (tufkrijt).

Ter plaatse van de boring is er 8 meter isolatie aangebracht. Tussen 0 en 8 meter was er zwarte klei en grind. Vanaf 8 meter kwam de formatie van Maastricht voor.

In de literatuur kan voor kalksteen waarden tussen 2,5 en 4 W/mK worden teruggevonden.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **67 W/mK** en een Rb-waarde van **0,12 K/(W/m)**.

Dit is een zeer hoge waarde die te wijten is aan lokale spleetporositeiten. Hierdoor zal er lokaal een zeer hoge grondwaterstroming bestaan die de warmte direct wegvoert. Deze waarde is dus geen globale waarde voor de formatie maar toont aan dat in deze formatie men nooit met zekerheid kan zeggen wat de geleidbaarheid is omwille van het zeer onregelmatige karakter van de formatie.

Formatie van Heers, Heers

De formatie van Heers wordt ingedeeld in de leden van Gelinden en Orp.

Het lid van Gelinden bestaat uit grijze fijnkorrelige, brosse, compacte mergel.

Het lid van Orp is een donkergroen fijnkorrelig glauconietzand. Dit lid is niet aangeboord geweest op deze locatie.

Op deze locatie kwam wel tussen 2 en 10 m de formatie van Hannut (lid van Lincen) voor. Er is 7 meter isolatie gebruikt, zodat nog moet gerekend worden met een drietal meter lid van Lincen.

Het grondwater bevindt zich op een twee meter diepte. De grondwaterstroming is laag.

In de literatuur zijn voor mergel waarden tussen 1,5 en 3,9 terug te vinden.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **4 W/mK** en een Rb-waarde van **0,16 K/(W/m)**.

Formatie van Hannut, St-Truiden

De formatie van Hannut bestaat uit fijne glauconiethoudende zanden, kleirijk en kalkrijk en dikwijls verkit. De formatie bestaat uit drie leden nl., de leden van Grandlise, Lincet en Waterschei.

De zanden van Hoegaarden (lid van Grandlise) zijn geelgroene middelkorrelige licht glauconiethoudende zanden.

Het lid van Lincet bestaat uit een grijsgroen zand of silt, vaak versteend tot siltsteen of fijnkorrelige zandsteen en intercalaties van bleek grijsgroene zandhoudende klei.

Op onze locatie werd de formatie na 2 meter quartair aangeboord. Tussen 2 en 8 meter kwam het lid van Grandlise (zanden van Hoegaarden) voor. Vanaf 8 meter het lid van Lincet.

De grondwaterstand is ongeveer 3 à 4 meter en de grondwaterstroming is zwak. Er is 2 meter isolatie aangebracht.

Voor silt wordt in de literatuur waarden van 1 tot 2,3 weergegeven met een aanbevolen waarde van 1,8 W/mK..

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,1 W/mK** en een Rb-waarde van **0,2 K/(W/m)**.

St-Huibrechts-Hern, Glabbeek

De lithologie wordt gedomineerd door zeer fijne zanden die rijk zijn aan glimmers. De basis bestaat uit licht kleihoudende zanden. Deze eenheid wordt het Lid van Grimmertingen genoemd. Boven deze zanden ontwikkelt zich het Lid van Neerrepen. Het is een karakteristiek fijnkorrelig zand dat groen ziet door de aanwezigheid van veel glauconiet.

Op de boorlocatie kwam deze formatie voor vanaf 6 meter.

Het grondwater bevindt zich op ongeveer 10 meter. De eerste 4 meter werden geïsoleerd.

Voor waterverzadigde zanden worden waarden van 1,7 tot 5 W/mK genomen met een voorkeur voor 2,4 W/mK. Voor niet waterverzadigde zanden varieert de geleidbaarheid in functie van de graad van verzadiging nl. van 0,3 (bij droog zand) tot 1,8 à 2,1 bij vochtig zand (tot 80% verzadigd).

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,58 W/mK** en een Rb-waarde van **0,16 K/(W/m)**.

De formatie van Brussel, Bierbeek

Grofkorrelige tot fijne zanden met wisselend kalkgehalte, met meestal weinig glauconiet, doorlopend rijk aan zandsteenverkittingen. Er kunnen 4 faciës onderscheiden worden nl. de kalkzanden van Diegem en Gobertangen en de zanden van Neerijse en Kraaiberg. Op de boorlocatie komt enkel het zand van Neerijse voor met aan de basis het zand van Kraaiberg (5-28 meter onder maaiveld). Het zand van Neerijse is een gemiddeld korrelig zand dat duidelijk glauconiethoudend is. In de niet ontkalkte zones bevat het tot 20% kalk en kan het kiezel- en kalkbanken bevatten. Het zand van Kraaiberg is een geel grof kwartszand met glauconiet. Het zand bevat veel verkiezelingen van bioturbaties en van oorspronkelijk

mergelige kleilaagjes. Onderaan werd de formatie van Kortrijk (homogene blauwe klei) nog voor een tweetal meter aangeboord.

Er is geen isolatie aangebracht. Het grondwater bevindt zich op een vijftal meter.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,16 W/mK** en een Rb-waarde van **0,22 K/(W/m)**.

De formatie van Boom, Mechelen

Grijze tot zwarte min of meer silthoudende klei. De formatie bestaat uit drie leden, nl. lid van Putte, lid van Terhagen en lid van Belsele-Waas. Volgens de literatuur is ter hoogte van de boring het lid van Terhagen aanwezig. Dit lid is overwegend bleekgrijze zware klei, vooral onderaan kalkhoudend. Ongeveer twee meter quartair.

In de literatuur zijn voor klei waarden terug te vinden tussen 0,9 en 2,2 met een aanbevolen waarde van 1,6 W/mK.

Geen isolatie.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,16 W/mK** en een Rb-waarde van **0,2 K/(W/m)**.

De formatie van Kortrijk, Ieper

De formatie van Kortrijk wordt ingedeeld in vier leden, nl. (van boven naar onder) lid van Aalbeke, lid van Moen, lid van Saint-Maur en lid van Mont-Héribu. Ter hoogte van de boring te Ieper zou er volgens de kaarten eerst een 12-tal meter lid van Aalbeke aanwezig zijn. Dit is een bijna uitsluitend zeer fijnsiltige, homogene blauwe zware klei zonder zand. Het lid van Aalbeke wordt gevolgd door het lid van Moen. Dit lid is een kleiige grove silt met kleilagen en nummulieten. Uit de spoelmonsters was het zeer moeilijk te achterhalen tot waar er het lid van Aalbeke voorkwam. Maar tot 15 à 20 meter was er geen zand waar te nemen in de monsters.

In de literatuur zijn voor klei waarden terug te vinden tussen 0,9 en 2,2 met een aanbevolen waarde van 1,6 W/mK. Voor silt worden waarden tussen 1 en 2,3 bekomen met een aanbevolen waarde van 1,8 W/mK.

Geen isolatie.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **1,62 W/mK** en een Rb-waarde van **0,26 K/(W/m)**.

De formatie van Maldegem, Maldegem

De formatie van Maldegem is een mariene eenheid bestaande uit een afwisseling van zanden en kleien met geleidelijke overgangen. Behalve aan de basis is de formatie niet kalkhoudend. De formatie bestaat uit zeven leden zijnde lid van Onderijke, lid van Buisputten, lid van Zomergem, lid van Onderdale, lid van Ursel, lid van Asse en lid van Wemmel.

Volgens de kaarten zou ter hoogte van de boring er eerst een zestal meter quartair voorkomen. Daarna wordt eerst het lid van Zomergem aangeboord. Dit is een grijsblauwe klei tot zware klei. Het lid van Onderdale is een lemig middelmatig fijn zand. Het lid van

Ursel is een homogene grijsblauwe tot blauwe klei tot zware klei, weinig of niet kalkhoudend en niet glauconiethoudend. Het lid van Asse bestaat uit glauconiethoudende zandige klei met plaatselijk, vooral aan de basis, grof glauconietzand. Het lid van Wemmel bestaat uit een pakket grijs glauconiethoudend fijn zand waar het kleigehalte toeneemt naar de top, waar het lid van Wemmel een grof glauconiethoudende klei vormt.

De spoelmonsters gaven vooral siltig zeer fijn zand weer. Slechts beperkt werd er kleiig zand gevonden maar niet de zware klei waarvan sprake op de kaartbladen.

Het grondwater bevindt zich op ongeveer twee meter.

Er is geen isolatie aangebracht.

Zoals beschreven heeft men in de formatie van Maldegem een afwisseling van zanden en kleien zodat voor de volledige formatie, volgens de literatuur, een waarde zou moeten genomen worden tussen 1,6 (aanbevolen waarde klei) en 2,4 W/mK (aanbevolen waarde waterverzadigde zand).

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,14 W/mK** en een Rb-waarde van **0,28 K/(W/m)**.

De formatie van Tielt, Tielt

De formatie van Tielt bestaat over het algemeen bovenaan uit een zeer fijn zand maar gaat naar onder toe over in een zeer fijnzandige grove silt. De formatie wordt opgedeeld in het lid van Egem en het lid van Kortemark. Het lid van Egem is glimmer- en glauconiethoudend zeer fijn zand, afgewisseld met dunne kleilagen. Het lid van Kortemark is een kleihoudende silt met zandsteenbanken en kleilagen.

Op de boorlocatie werd eerst een 4 meter quartair aangeboord, gevolgd door 4 meter lid van Egem en daarna door het lid van Kortemark.

De grondwaterstand bedraagt een 2-3 meter.

Er is vier meter isolatie aangebracht.

In de literatuur worden voor silt waarden tussen 1 en 2,3 bekomen met een aanbevolen waarde van 1,8 W/mK.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **2,11 W/mK** en een Rb-waarde van **0,16 K/(W/m)**.

De formatie van Gent, Aalter

De formatie van Gent bestaat uit zandig-kleiige sedimenten. De formatie bestaat uit drie leden nl. het lid van Vlierzele, lid van Pittem en het lid van Merelbeke.

Het lid van Vlierzele is een grijsgroen glauconiethoudend fijn zand. Naar onder toe gaat het over in een meestal homogeen, kleiig zeer fijn zand. In het lid van Pittem wordt een pakket kleihoudend zand tot zandhoudende klei aangetroffen.

Ter plaatse van de boring werd een 2-tal meter quartair aangetroffen, gevolgd door 14 meter lid van Vlierzele. Tot 29 meter werd het lid van Pittem aangeboord.

Het grondwater bevindt zich op een tweetal meter.

Er is 5 meter isolatie aangebracht.

Daar we te maken hebben met zand-klei zal volgens de literatuurgegevens waarden tussen 1,6 en 2,4 W/mK moeten genomen worden.

De in-situ test gaf een λ -waarde van **3,19 W/mK** en een Rb-waarde van **0,13 K/(W/m)**.

5,0 - 4,0 mm	Grind
1,0 - 5,0 mm	Zand (zeer grof)
0,5 - 1,0 mm	Zand (groot)
0,25 - 0,5 mm	Zand (middelmatig)
0,125 - 0,25 mm	Zand (fijn)
0,075 - 0,125 mm	Zand (zeer fijn)
0,005 - 0,03 mm	Silt
< 0,005 mm	Klei

Tabel 1. Overzicht granulometrie

Tabel 1. Overzicht granulometrie

De afbeelding toont een tabel met de afmetingen van de deeltjes in millimeters. De afmetingen zijn: 5,0 - 4,0 mm, 1,0 - 5,0 mm, 0,5 - 1,0 mm, 0,25 - 0,5 mm, 0,125 - 0,25 mm, 0,075 - 0,125 mm, 0,005 - 0,03 mm, en < 0,005 mm. De afbeelding is een scan van een document en is daarom wat onscherp.

6. GEOTECHNISCHE EN GEOFYSISCHE PARAMETERS

De thermische karakteristieken van de ondiepe ondergrond op een specifieke locatie hangen uiteraard volledig samen met de typische geologische kenmerken van de aangetroffen dagzomende formatie (zie ook fig. 3.1). Het lijkt dan ook voor de hand liggend dat er een éénduidig verband kan gevonden worden tussen een aantal geotechnische en –fysische parameters van de betreffende formaties en de voornoemde thermische parameters. Zo is er mogelijk een verband tussen de lambda-waarde en korrelgrootte en –verdeling van de zand-, silt- en kleilagen.

Een eerste benadering betreft een analyse van de granulometrie, de discipline die onderzoek verricht naar de afmetingen van partikels zoals die in natuurlijke sedimenten voorkomen, ongeacht hun mineralogische aard. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de verschillende granulometrische klassen (tabel 6.1). Silt kan onderscheiden worden van zand doordat de korrelgrootte kleiner is dan 63 μm . Korrelgroottes onder 45 μm zijn onmogelijk via klassieke zeeftechnieken te onderscheiden (noodzaak aan sedimentatietesten). Het is dan ook niet mogelijk om de overgang van silt naar klei via deze weg te bepalen. Deeltjes kleiner dan 2 μm worden als klei gecatalogeerd. Gezien het beperkt aantal uitgesproken kleiige formaties waarin de testen uitgevoerd werden is hierin voorlopig geen verder onderzoek verricht.

Grind	2,0 ... 4,0 mm
Zand (zeer grof)	1,0 ... 2,0 mm
Zand (grof)	0,5 ... 1,0 mm
Zand (middelmattig)	0,25 ... 0,5 mm
Zand (fijn)	0,125 ... 0,25 mm
Zand (zeer fijn)	0,63 ... 0,125 mm
Silt	0,002 ... 0,63 mm
Klei	< 0,002 mm

Tabel 6.1 : overzicht granulometrie

Tijdens de uitvoering van de boorwerkzaamheden voor het aanbrengen van de verticale warmtewisselaars, ter voorbereiding van de geleidbaarheidstesten, werd steeds een staal genomen van elke meter boordiepte. De gemeten en gespecificeerde thermische karakteristieken gelden voor het volledige dieptetraject van de verticale warmtewisselaar, een analyse van één enkel monster op één specifieke boordiepte is dan ook niet aangewezen. Om een representatief staal te kunnen analyseren werd een mengsel gemaakt van de bodemmonsters over het ganse thermisch actieve wisselaartraject.

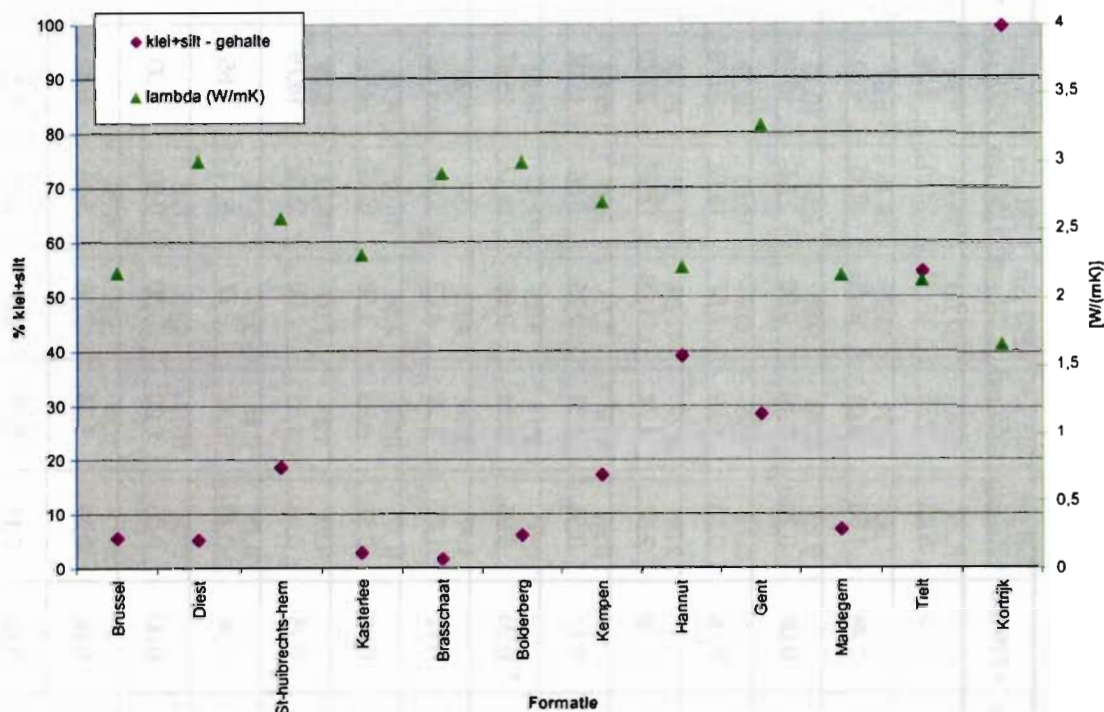
Een zeefanalyse van deze monsters geeft een idee omtrent de aangetroffen korrelgrootte op de locatie. Tabel 6.2 geeft een overzicht van de zeefanalyse. Het betreft hier 14 analyses, de geleidbaarheidstest in de formatie van Boom vond plaats op een reeds eerder geplaatste warmtewisselaar waarvan geen stalen beschikbaar waren. Uit deze resultaten kan reeds

onmiddellijk afgeleid worden welk het overheersende ondergrondtype is op de verschillende locaties.

Formatie	voor natte zeving (<45 µm)	voor droge zeving	>1000 µm	>710 µm	>500 µm	>355 µm	>250 µm	>180 µm	>125 µm	>90 µm	>63 µm	>45 µm
Brussel	57,47	54,52	2,01	2,73	5,25	8,25	17,09	13,61	3,94	0,92	0,42	0,25
Diest	53,09	50,58	0,37	0,49	1,60	5,01	16,00	18,45	5,61	1,86	0,88	0,30
St-huibrechts-hern	53,15	46,29	0,71	0,08	0,29	0,49	0,98	2,54	10,15	16,31	11,68	3,03
Kasterlee	62,81	61,42	0,24	0,16	0,73	1,99	4,67	18,82	29,78	4,04	0,56	0,16
Brasschaat	67,00	65,93	3,19	1,18	2,07	4,77	11,06	17,27	20,42	5,19	0,67	0,13
Bolderberg	69,12	65,91	0,16	0,15	0,55	1,37	2,75	5,05	15,04	33,91	5,87	1,09
Kempen	64,93	55,13	0,16	0,29	0,96	3,14	9,90	11,17	10,57	9,39	8,16	1,39
Hannut (Lincent)	63,76	43,17	0,43	0,52	1,77	3,28	4,83	5,53	4,96	8,63	8,89	4,22
Gent	53,57	40,98	0,01	0,05	0,17	0,93	3,56	15,87	4,76	8,98	5,96	0,72
Maldegem	60,00	56,46	0,22	0,25	0,94	1,81	7,00	15,01	18,79	8,62	3,06	0,79
Tielt	53,37	36,90	1,67	0,28	0,48	0,47	0,77	5,14	8,65	11,01	7,19	1,17
Kortrijk	46,60	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,50
Maastricht	44,06	41,22	3,90	0,56	0,93	1,38	3,36	5,35	6,43	9,53	6,32	3,44
Heers	45,52	27,47	0,12	0,06	0,11	0,18	0,63	2,02	6,52	11,21	5,71	1,12

Tabel 6.2 : Zeefanalyse bodemmonsters – gewicht in gram

De formatie van Kortrijk bestaat uit meer dan 99,5 % uit klei/silt en is hiermede de meest uitgesproken kleiformatie uit het onderzoek. Ook de formatie van Boom is eveneens overwegend uit homogene klei opgebouwd, doch niet geanalyseerd. Daarnaast zijn vooral de formaties van Tielt (49 %), Hannut (39 %), Gent (28 %), St-Huibrechts-Hern (19 %) en het complex van de Kempen (17 %) silt- en kleihoudend. Van deze formaties wordt dan ook de slechtste geleidbaarheid verwacht in verhouding tot het silt/kleigehalte. Een eerste vaststelling betreft dat dit slechts ten dele terug te vinden is in de resultaten (zie figuur 6.3).

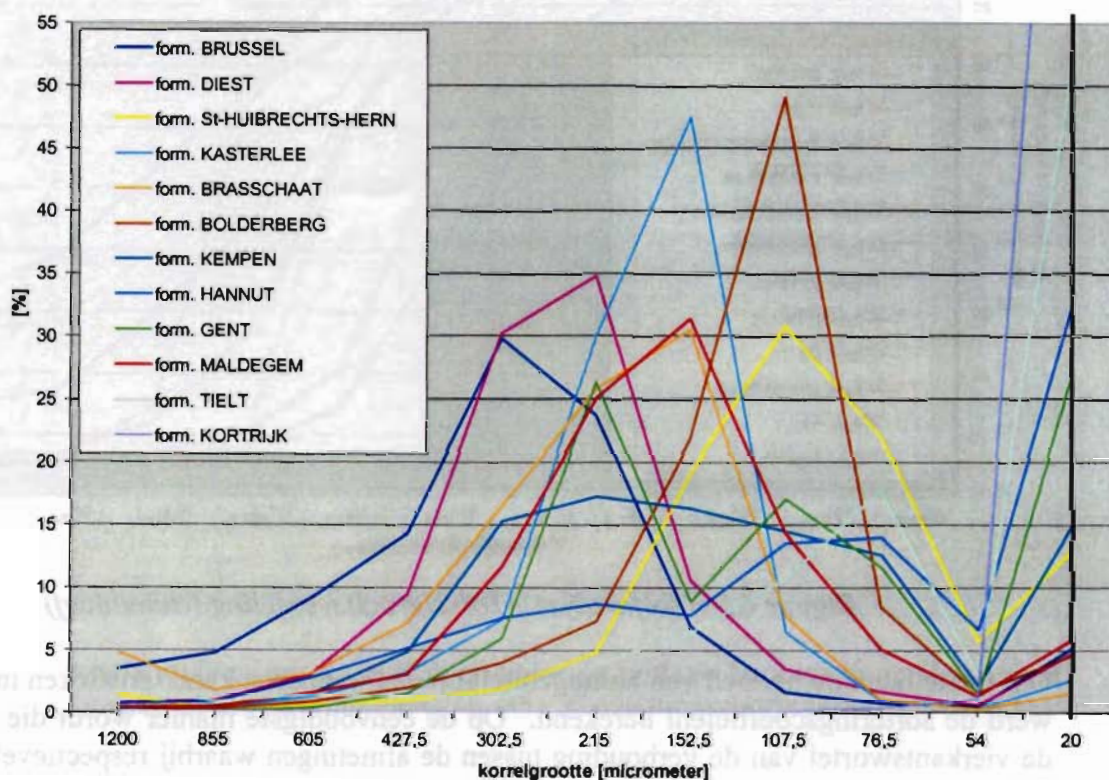


Figuur 6.3 : Verband silt/klei-gehalte en geleidbaarheidscoëfficiënt

Vooraf de (zeer) hoge geleidbaarheid van de formatie van Boom (2,18 W/(mK)) is opvallend. Een lambda-waarde vergelijkbaar met deze van Kortrijk (1,66 W/(mK)) werd verwacht. Integendeel blijkt de geleidbaarheid identiek te zijn aan de grofkorrelige zanden van Brussel, die op zijn beurt een lager dan verwachte geleidbaarheid aangeeft. Tevens zeer opvallend is dat de hoogste geleidbaarheid, met uitzondering van de krijt- en mergelformaties, opgetekend werd bij de formatie van Gent. Op de locatie van de geleidbaarheidstest bestaat deze formatie volgens de analyses voor 28% uit silt en klei.

Het blijkt dan ook dat een eenvoudige klei / zand / silt-opdeling in relatie tot de thermische karakteristieken van de bodem een te simplistische benadering is en dat een verdere analyse van beschikbare gegevens aan de orde is. In de verder analyse zijn de formaties van Maastricht en Heers niet opgenomen, de hoge tot zeer hoge thermische karakteristieken worden vooral toegewezen aan een onvoorspelbare spleetporositeit dewelke toepassingen voor energie-opslag zeer moeilijk, zonet onmogelijk maakt. Voor louter warmte-onttrekking (bv. bij warmtepomptoe toepassingen) kunnen deze krijt- en mergelformaties echter wel interessante opportuniteiten bieden.

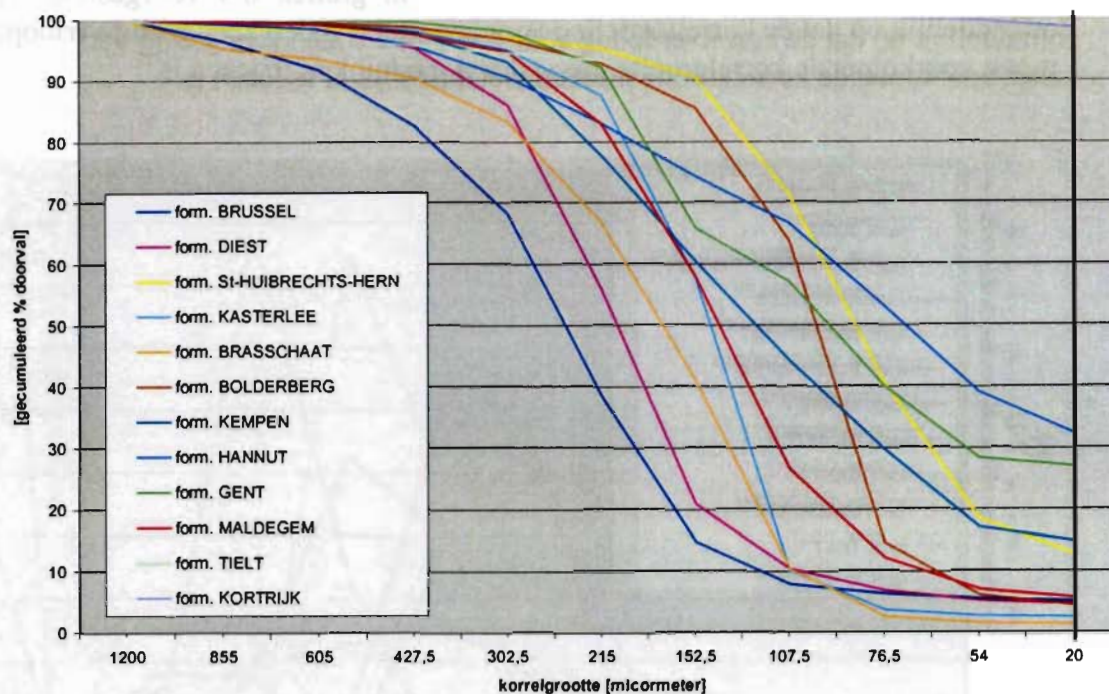
De granulometrische analyseresultaten worden in grafiek 6.4 voorgesteld. Hierbij valt onmiddellijk op dat de korrelverdeling voor een aantal stalen zeer grillig verloopt, hoewel de meest voorkomende korrelgrootte meestal wel duidelijk af te lezen is.



Figuur 6.4 : Zeefanalyse - korrelgrootteverdeling

De stalen genomen op boorlocaties bestaande uit een duidelijke éénduidige formatie benaderen hierbij het meest de typische Gauss-curve. Op een aantal locaties werden echter, naast een aantal meters kwartaire afzettingen, verschillende leden van eenzelfde formaties aangeboord met duidelijk verschillende geologische kenmerken. Typische voorbeelden zijn de formaties van Gent (met lid van Vlierzele (fijn zand) en Pittem (zandhoudende klei)) en Tielt (met lid van Egem (fijn zand) en Kortemark (kleihoudende silt)). Door het nemen van het mengmonster geeft dit bovenstaand resultaat. Anderzijds is ook de kwartaire formatie van de Kempen zeer heterogeen van structuur, dit komt doordat het een zeer complexe samenstelling heeft waarin zand-, silt- en kleilagen elkaar wispelturig opvolgen.

Een voorstelling van de gegevens op een cumulatieve kromme geeft mogelijk een beter zicht op de verdeling (fig. 6.5). De meest linkse curves behoren toe aan de grofste zanden uit de test, de meest rechtse staan voor de meest kleihoudende sedimenten. Des te steiler de curve, des te homogener de formatie en des te gelijkjer de sortering. Hieruit blijkt nogmaals het hoge kleigehalte van Kortrijk, Tielt en Hannut. De meest linkse curve hoort toe aan de formatie van Brussel, hetgeen volgens eerder aangehaalde zandindeling uit tabel 6.1 als een overwegend middelmatig zand te catalogeren is.



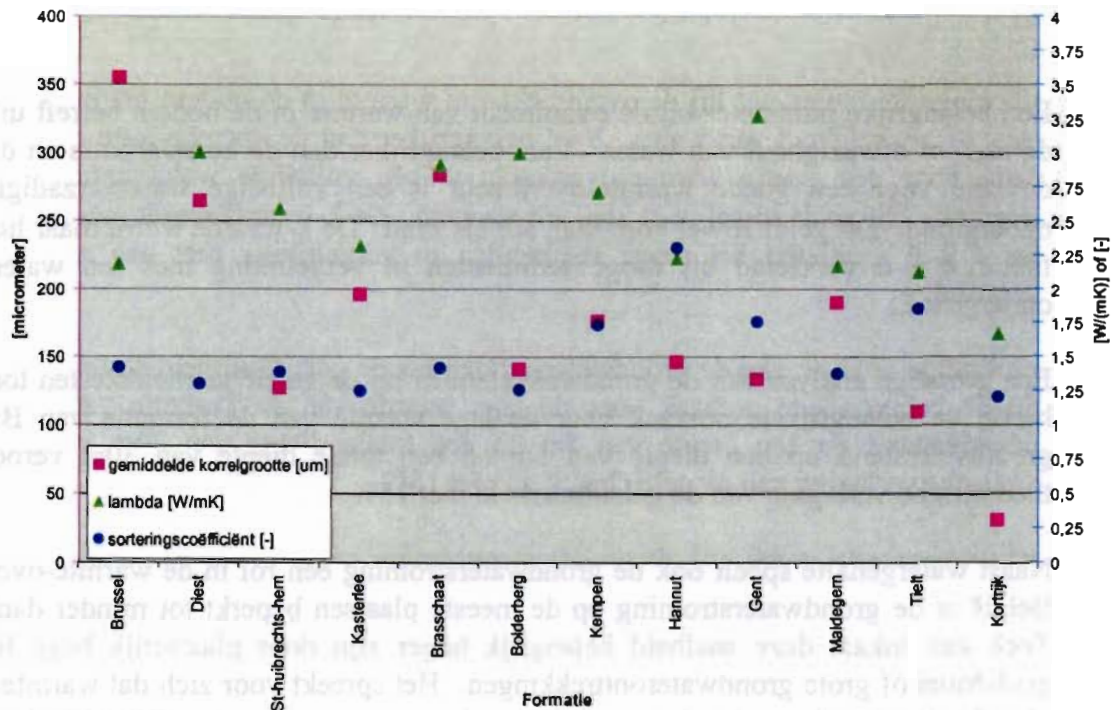
Figuur 6.5 : Zeefanalyse – korrelgrootteverdeling (cumulatief)

Om toe te laten de invloed van homogeniteit op de thermische karakteristieken in te schatten werd de sorteringscoëfficiënt berekend. Op de eenvoudigste manier wordt die bepaald als de vierkantswortel van de verhouding tussen de afmetingen waarbij respectievelijk 25% en 75% van de massa op de fictieve zeven blijft liggen :

$$s = \sqrt{\frac{P_{25}}{P_{75}}}$$

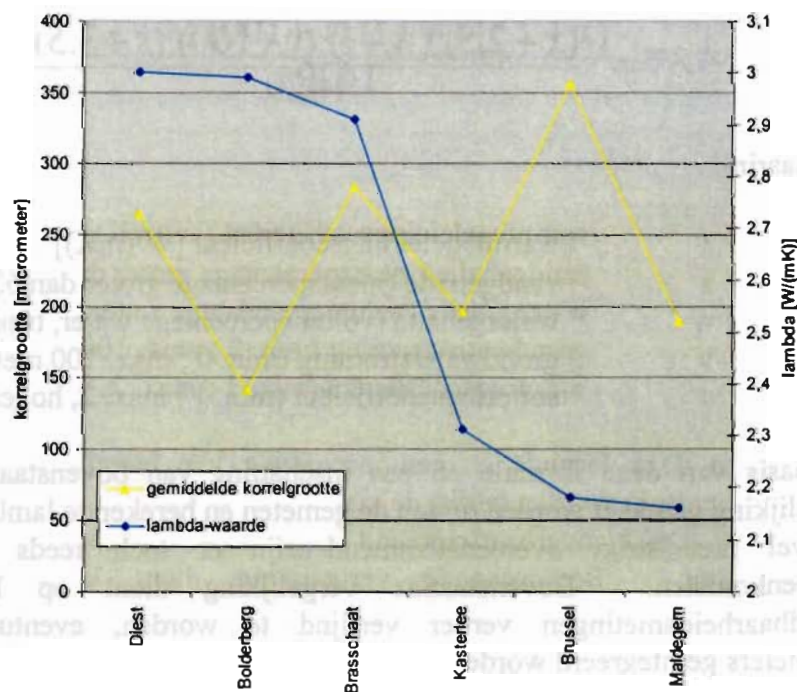
De coëfficiënt is steeds groter dan 1 en vergroot naargelang de sortering van de sedimenten slechter wordt. Een overzicht van de sorteringscoëfficiënten is weergegeven in figuur 6.6. De gemiddelde korrelgroottes en de gemeten geleidbaarheidscoëfficiënten van de verschillende stalen zijn eveneens toegevoegd om een vergelijking mogelijk te maken.

Hieruit kan afgeleid worden dat een grote heterogeniteit een positieve invloed heeft op de geleidbaarheidscoëfficiënt. De formaties van Gent en de Kempen, en in mindere mate ook deze van Hannut en Tielt, tonen een hogere geleidbaarheid dan verwacht. Deze formaties tonen een grotere spreiding van de korrelgroottes. Dit kan eventueel ook een mogelijke verklaring vormen voor de belangrijke afwijking naar thermische karakteristieken toe voor de formaties van Kortrijk en Boom (twee overwegend silt/klei-formaties). De formatie van Kortrijk bestaat, ter plekke de geleidbaarheidsmeting, vooral uit zeer homogene klei (vnl. formatie van Aalbeke), de formatie van Boom wordt gekenmerkt door een ritmische verandering van het silt- en kleigehalte en een zandgehalte dat lokaal kan oplopen tot 30%.



Figuur 6.6 : Overzicht sorteringscoëfficiënten

Het is tevens duidelijk uit deze figuur dat de gemiddelde korrelgrootte van de verschillende zanden slechts een geringe impact hebben op de lambda-waarde, hetgeen een vreemde conclusie is daar wel ontegensprekelijk duidelijk is dat klei een slechtere geleidbaarheid heeft vergeleken met silt en hetzelfde voor silt vergeleken met zand. Onderstaande figuur 6.7 toont dit voor de typische zandige formaties uit de test per dalende geleidbaarheidscoëfficiënt.



Figuur 6.7: Verband gemiddelde korrelgrootte – lambda-waarde

Een belangrijke parameter bij de overdracht van warmte in de bodem betreft uiteraard ook de aan- of afwezigheid van water. Veel belangrijker dan de korrelgrootte en de standaard deviatie voor een goede warmte-overdracht is een volledige waterverzadiging van de ondergrond. Dit geldt zowel voor klei, silt als zand. De λ -waarde wordt maar liefst met een faktor 4 à 6 verkleind bij droge sedimenten in vergelijking met een waterverzadigde ondergrond.

Een grondige analyse van de grondwaterstanden bij de geleidbaarheidstesten tonen aan dat hierin de belangrijkste oorzaak voor de lage waarde van de formatie van Brussel. De grondwaterstand op een diepte van 5m op een totale diepte van 30m veroorzaakt een theoretische verlaging van de geleidbaarheid met 15%.

Naast watergehalte speelt ook de grondwaterstroming een rol in de warmte-overdracht. In België is de grondwaterstroming op de meeste plaatsen beperkt tot minder dan 20 m/jaar. Toch kan lokaal deze snelheid belangrijk hoger zijn door plaatselijk hoge hydraulische gradiënten of grote grondwateronttrekkingen. Het spreekt voor zich dat warmte sneller kan af- of aangevoerd worden bij grotere grondwaterverplaatsingen. Dit aspect speelt in het voordeel van de zand- vergeleken met kleiformaties in het streven naar hogere geleidbaarheden. Uiteraard betekent een grotere grondwatersnelheid ook dat bij energie-opslagprojecten de opgeslagen warmte of koude sneller zal verdwijnen (dus lagere opslagrendementen).

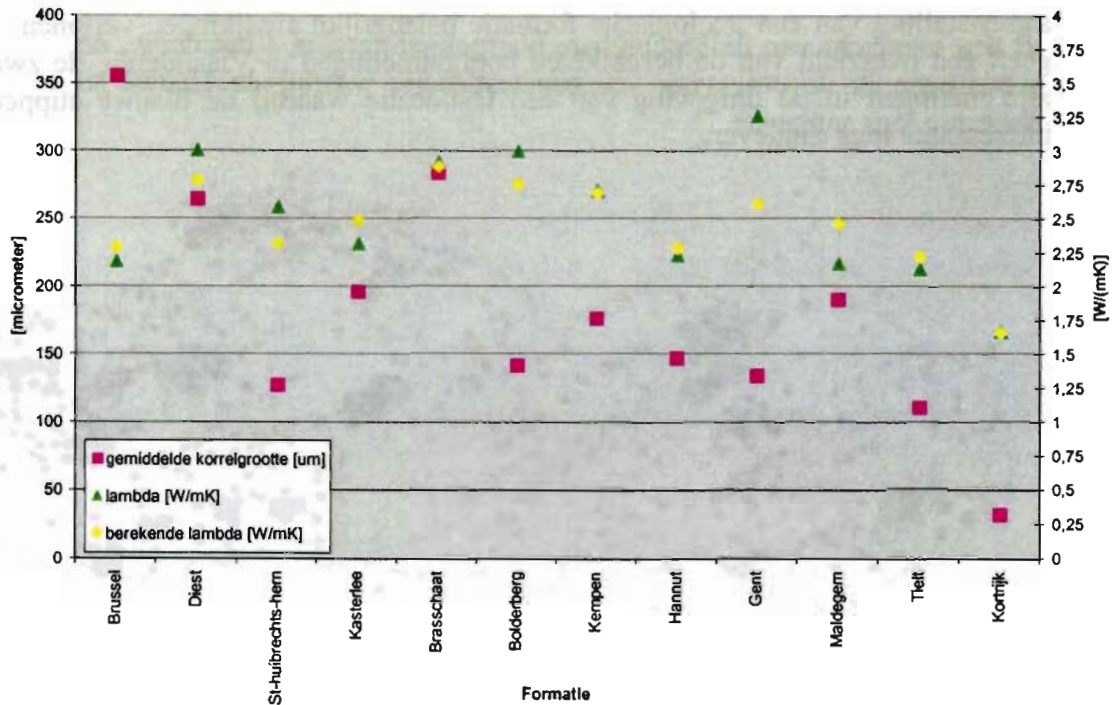
Een grondige analyse van alle aangehaalde invloedsfactoren op basis van de meetresultaten en een kwantificering van de grootte van hun impact op de thermische geleidbaarheidscoëfficiënt heeft geleid tot volgende empirische bepaalde formule :

$$\lambda = \frac{(x + 2,5) \cdot (w + 1) \cdot (v + 100) \cdot (s + 3.5)}{1429} \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$$

met daarin :

λ	warmtegeleidingscoëfficiënt [W/(mK)]
x	zandgehalte (massapercentage groter dan 63 μ m, tussen 0...1) [-]
w	watergehalte (volumepercentage water, tussen 0...1) [-]
v	grondwaterstroming (min. 0 ; max. 100 meter per jaar) [m/jaar]
s	sorteringscoëfficiënt (min. 1 ; max. 2, hogere waardes aftoppen) [-]

Op basis van deze formule en een inschatting van bovenstaande parameters kon een vergelijking gemaakt worden tussen de gemeten en berekende lambda-waarde (zie fig. 6.8). Hoewel niet strikt overeenstemmend zijn er toch reeds een aantal belangrijke overeenkomsten. Bovenstaande vergelijking dient op basis van toekomstige geleidbaarheidsmetingen verder verfijnd te worden, eventueel dienen bijkomende parameters geïntegreerd worden.



Figuur 6.8: Overzicht boorgatmetingen

Naast de bovenstaande gegevens werd ook informatie vergaard omtrent boorgatmetingen in voormelde formaties. Deze gegevens werden verzameld uit de omgeving van de locatie van de geleidbaarheidstesten. Bij geofysische boorgatmetingen wordt getracht om bijkomende informatie te verkrijgen omtrent allerlei fysische eigenschappen van de aangetroffen sedimenten.

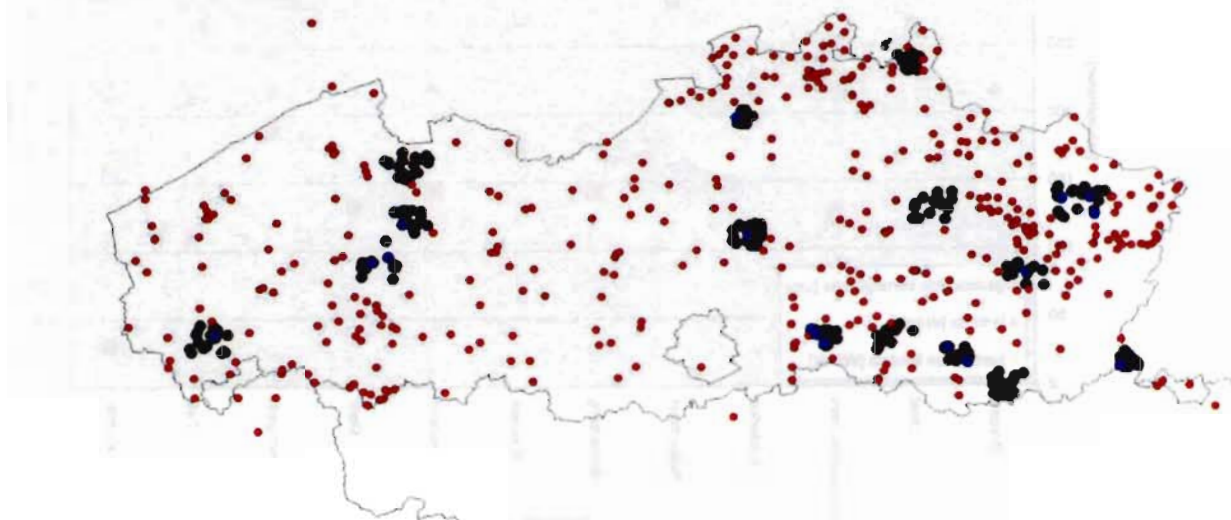
Een overzicht van de voornaamste boorgatmetingen :

- | | |
|-------------------------------|--|
| ▪ CL – caliper log | meting boorgatdiameter |
| ▪ GR – gamma ray | meting natuurlijke radioactiviteit |
| ▪ SP – self potential | meting natuurlijk potentiaalverschil |
| ▪ RL – resistivity log | meting resistiviteit / elektrische geleidbaarheid |
| ▪ TL – temperature log | meting boorgattemperatuur |
| ▪ AL – acoustic log | meting geluidstransmissie |
| ▪ DL – density log | meting dichtheid |
| ▪ NL – neutron log | meting neutronenabsorptie |

De eerste vier boorgatmetingen (CL – GR – SP – RL) worden het meest courant uitgevoerd, de andere slechts sporadisch. Boorgatmeetgegevens zijn echter slechts beperkt beschikbaar, op slechts een klein percentage van de boringen wordt ook effectief een boorgatmeting uitgevoerd. Het heeft dan ook de nodige moeite gekost om van elke formatie minstens één log terug te vinden (meeste gegevens zijn beschikbaar op de BGD).

Momenteel zijn deze gegevens nog niet digitaal beschikbaar via DOV-Vlaanderen. Voor sommige formaties was er slechts een log terug te vinden op een afstand van meer dan 10 km van de plaats van de geleidbaarheidsmeting. Over dergelijke afstand kan uiteraard de

samenstelling van een geologische formatie belangrijke afwijkingen vertonen. Figuur 6.9 geeft een overzicht van de beschikbare boorgatmetingen in Vlaanderen, de zwarte stippen zijn metingen in de omgeving van een testlocatie waarbij de blauwe stippen de meest interessante logs aangeven.



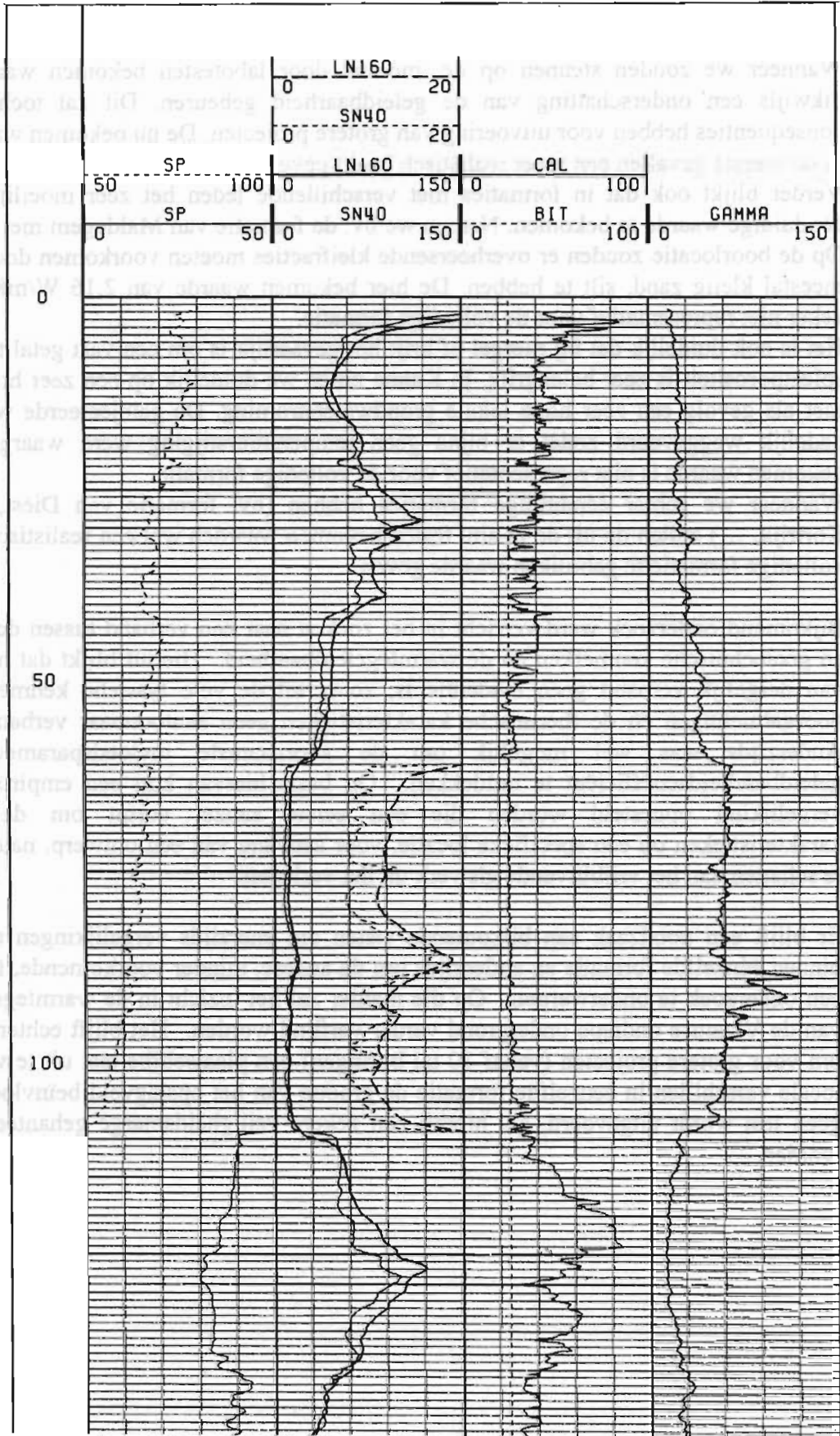
Figuur 6.9: Overzicht boorgatmetingen

Al de verzamelde gegevens werden geanalyseerd en vergeleken met de geleidbaarheidscoëfficiënt. Een belangrijke conclusie betreft de quasi onmogelijkheid om een verband te vinden tussen thermische en fysische eigenschappen van sedimenten. De geleidbaarheid wordt steeds gemeten over betrekkelijk lange trajecten (20 – 100 m, in dit geval 30 m). Over zo'n traject zullen de geofysische parameters meestal in één of andere zin bewegen, meestal zullen de waardes systematisch af- en toenemen. Boorgatmetingen laten toe om zeer nauwkeurig een onderscheid te maken in de geologische samenstelling op een bepaalde locatie, als gemiddelde waarde over een groot traject hebben deze gegevens echter geen waarde.

In figuur 6.10 wordt een overzicht gegeven van dergelijke boorgatmeting, uitgevoerd te Lummen. Deze log is interessant omdat er verschillende formaties op één plaats werden aangeboord, waaronder de thermisch geanalyseerde formaties van Diest, Bolderberg, Boom en St-Huibrechts-Hern.

De plaatselijke geologie werd als volgt gedefinieerd :

- 0 – 3 m : quartaire afzettingen
- 3 – 40 m : *formatie van Diest*
- 40 – 48 m : *formatie van Bolderberg*
- 48 – 61 m : formatie van Eigenbilzen
- 61 – 109 m : *formatie van Boom*
- 109 – 125 m : formatie van Bilzen
- 125 – 150 m : *formatie van St-Huibrechts-Hern*



Figuur 6.10: Voorbeeld boorgatmeting te Lummen

7 BESLUIT

Wanneer we zouden steunen op de, meestal door labotesten bekomen waarden, zal er dikwijls een onderschatting van de geleidbaarheid gebeuren. Dit zal toch behoorlijke consequenties hebben voor uitvoering van grotere projecten. De nu bekomen waarden zullen in de meeste gevallen een meer realistisch beeld geven.

Verder blijkt ook dat in formaties met verschillende leden het zeer moeilijk is om een éénduidige waarde te bekomen. Nemen we bv. de formatie van Maldegem met zeven leden. Op de boorlocatie zouden er overheersende kleifracaties moeten voorkomen doch men blijkt meestal kleilig zand, silt te hebben. De hier bekomen waarde van 2,16 W/mK is dan ook zeker niet representatief voor de volledige formatie.

Het is ook duidelijk dat bij mergel of krijt het gevaarlijk is om een vast getal te nemen. De spleetporositeit is zeer belangrijk. In Kanne zitten we duidelijk op een zeer hoge porositeit met als gevolg een zeer hoge lokale grondwaterstroming. De geïnjecteerde warmte wordt dadelijk weggevoerd zodat er bijna geen temperatuurstijging werd waargenomen. De bekomen waarde is niet representatief voor de volledige formatie.

Wanneer we echter éénduidige formaties hebben (bv. formatie van Diest, Brasschaat, Kortrijk, ...) zullen de uit de in-situ testen bekomen waarden wel een realistisch en voor de volledige formatie te gebruiken waarde geven.

Bijkomend onderzoek werd verricht in het zoeken naar een verband tussen de geofysische en geotechnische kenmerken en de warmtegeleidbaarheid. Hieruit blijkt dat het definiëren van dergelijk verband geen evidentie is, zo is uit de vele fysische kenmerken van de boorgatmetingen en de thermische karakteristieken geen aantoonbaar verband gevonden. Anderzijds was wel mogelijk om de voornaamste invloedsparameters op de geleidbaarheidscoëfficiënt te ontdekken. Op basis hiervan kon een empirisch bepaalde vergelijking opgesteld worden die een eerste aanzet vormt om de thermische karakteristieken op een specifieke locatie, voor aanvang van een ontwerp, nauwkeuriger in te schatten dan het vrijblijvende giswerk uit het verleden.

Er blijft een noodzaak aan bijkomende testen om enerzijds vergelijkingen uit te voeren binnen éénzelfde formatie en anderzijds om de andere, minder voorkomende, formaties aan een onderzoek te onderwerpen. Op die manier zal het inzicht in de warmtegeleidbaarheid van de Vlaamse ondiepe ondergrond verder verfijnd worden. Het blijft echter aangewezen om voor grotere projecten (vanaf 10-tal boringen) een plaatselijke test uit te voeren omdat lokale verschillen in eenzelfde formatie de grootte van het opslagveld beïnvloeden. Indien geen test wordt uitgevoerd, zal hierbij een zekere veiligheidsmarge gehanteerd dienen te worden.