



Bepaling van de thermische geleidbaarheid van geologische formaties en het opstellen van een geschiktheidskaart voor de toepassing van boorgatenergie-onttrekking via sondes

Meetcampagne uitgevoerd in opdracht van Albon

N. Robeyn en H.Hoes

FINALE VERSIE

Terra Energy NV
een spin off van



Augustus 2011

INHOUDSTABEL

SAMENVATTING.....	3
1 INLEIDING	4
2 LOCATIES	6
3 BESCHRIJVING VAN THERMISCHE RESPONS TEST.....	10
3.1 <i>Installeren van de vertical warmtewisselaars.....</i>	<i>10</i>
3.2 <i>Meetwagen.....</i>	<i>12</i>
3.3 <i>Meetmethode.....</i>	<i>13</i>
3.4 <i>Lambda-correctie</i>	<i>15</i>
3.5 <i>Resultaten</i>	<i>17</i>
4 GESCHIKTHEIDSKAART VLAANDEREN	28
5 BESLUIT.....	37
REFERENTIES.....	38
BIJLAGE	39

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Overzicht locatie boringen en formatie	9
Tabel 2: Overzicht van de resultaten van de meetcampagne.....	17
Tabel 3: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 25 meter).....	17
Tabel 4: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 25 meter)	18
Tabel 5: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 24 meter).....	20
Tabel 6: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 24 meter)	20
Tabel 7: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 50 meter)	21
Tabel 8: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 50 meter)	21
Tabel 9: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 47 meter)	22
Tabel 10: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 47 meter)	22
Tabel 11: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 41 meter)	23
Tabel 12: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 41 meter)	23
Tabel 13: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 29 meter)	23
Tabel 14: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 29 meter)	24
Tabel 15: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 25 meter)	24
Tabel 16: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 25 meter).....	24
Tabel 17: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 28 meter)	25
Tabel 18: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 28 meter)	25
Tabel 19: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 28 meter).....	26
Tabel 20: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 28 meter).....	26
Tabel 21: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 25 meter)	27
Tabel 22: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 25 meter)	27
Tabel 23: Overzicht van gemeten geleidbaarheid	31

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Overzicht locaties voor 'thermische respons test' op Tertiairkaart Vlaanderen (bron DOV)	8
Figuur 2: Legende bij Figuur 1 – verschillende formaties - leden.....	9
Figuur 3: spoelboring voor Albon-geleidbaarheid-meetcampagne.....	10
Figuur 4: verticale warmtewisselaar	11
Figuur 5: Meetopstelling in aanhangwagen	12
Figuur 6: in- en uitgaande vloeistoftemperaturen	18
Figuur 7: Gemiddelde vloeistoftemperatuur op logaritmische schaal met lineaire regressie.....	19
Figuur 8: Temperaturen in de bodem voor en na de test.....	20
Figuur 9: Gemiddelde thermische geleidbaarheid tot op een diepte van 100 m of tot op de vaste rots	34
Figuur 10: Min gemiddelde thermische geleidbaarheid tot op een diepte van 100 m of tot op de vaste rots ...	35
Figuur 11: : Max gemiddelde thermische geleidbaarheid tot op een diepte van 100 m of tot op de vaste rots .	36

SAMENVATTING

Om de toepassing van boorgat-energieopslag te stimuleren werd in 2004 een eerste meetcampagne uitgevoerd om de nodige parameters nodig voor het ontwerp van een geschiktheidskaart in kaart te brengen. Hiervoor werden 15 van de meest voorkomende formaties in Vlaanderen bemeten en in kaart gebracht.

Om het inzicht in de ondergrond in Vlaanderen verder te ontwikkelen werden nog 10 extra formaties geanalyseerd waardoor de geschiktheidskaart verder verfijnd kan worden naar het gebruik van verticale sondes voor energiewinning en –opslag.

Om deze formaties zo goed mogelijk te kunnen bemeten werden volgende lokaties geselecteerd:

- Beernem Formatie van Aalter
- Eeklo Quartair van de Vlaamse Vallei
- Brecht Formatie van Lillo
- Ranst Formatie van Berchem
- Meise Formatie van Lede
- Zoutleeuw Formatie van Tienen
- Borgloon Formatie van Borgloon
- Hasselt Formatie van Voort-Eigenbilzen
- Bilzen Formatie van Bilzen
- Bree Maasgrinden

Op elk van de lokaties in er een warmtegeleidbaarheidsmeting uitgevoerd, wat resulteerde in volgende λ -waarden:

- Formatie van Aalter 2,61 [W/mK]
- Quartair van de Vlaamse Vallei 2,41 [W/mK]
- Formatie van Lillo 2,31 [W/mK]
- Formatie van Berchem 1,74 [W/mK]
- Formatie van Lede 2,33 [W/mK]
- Formatie van Tienen 1,99 [W/mK]
- Formatie van Borgloon 2,33 [W/mK]
- Formatie van Voort-Eigenbilzen 1,8 [W/mK]
- Formatie van Bilzen 2,47 [W/mK]
- Maasgrinden 2,67 [W/mK]

Deze gemeten λ -waarden gecombineerd met de resultaten van de meetcampagne van 2004, zijn een goed uitgangspunt voor het ontwerp van een BEO-veld. Hoe hoger deze waarde hoe minder meters bodemwarmtewisselaars er nodig zijn en hoe beter de warmtegeleiding geschiedt.

1 INLEIDING

Over de jaren heen zijn reeds vele technieken ontwikkeld en initiatieven genomen in het streven naar en stimuleren van meer efficiënt gebruik van energie. Toch gaat nog steeds veel thermische energie verloren. Vraag naar en aanbod van energie vallen niet altijd samen. Hierdoor gaat vandaag energie verloren die morgen misschien wel nuttig kan zijn. Men kan deze energie voor langere tijd (seizoenale opslag) bewaren in de ondergrond. De bodem blijkt immers een prima opslagmedium voor zowel lage als hoge temperatuur.

Vooraf de “ondiepe” geothermische energiesystemen komen in aanmerking voor dergelijke energieopslag. De ondiepe systemen zijn beperkt tot op een diepte van 200 m, deze zijn verder onder te verdelen in verschillende categorieën. Er zijn enerzijds de warmte-onttrekkingsystemen, anderzijds de energie-opslagsystemen.

Bij warmte-onttrekking maakt men gebruik van de natuurlijke en constante temperatuur van de bodem om te verwarmen. Meest gekend zijn de grondgekoppelde warmtepompsystemen die warmte onttrekken aan de bodem. Een warmtepomp pompt (figuurlijk uitgelegd) de warmte op van een lager (12°C) naar een hoger (35-45°C) niveau. Dit gebeurt aan een hoog rendement, de warmtelevering bedraagt gemiddeld 4 keer het elektriciteitsverbruik van de warmtepomp. Warmte-onttrekking kan gebeuren met behulp van beschikbaar grondwater (open systeem) of via verticale of horizontale lussen (gesloten systemen). Deze vormen de opties voor grondgekoppelde warmtepompen.

Bij energie-opslag zal men seizoenaal thermische energie stockeren met de bedoeling om deze energie te recupereren op het gewenste ogenblik. Energie-opslag maakt min of meer gebruik van dezelfde basistechnologieën als bij warmte-onttrekking, maar maakt beter gebruik van de opslagmogelijkheden van de bodem. Bij gebruik van grondwater komt men tot koude-warmteopslag (KWO), het gebruik van verticale warmtewisselaars leidt tot een boorgat-energieopslaginstallatie (BEO). De horizontale systemen zijn niet bruikbaar als opslagsysteem. Door de geringe diepte waarin deze zich bevinden en de weinig compacte activatie van de bodem is er sprake van een natuurlijke afvoer van ingebrachte koude of warmte. Bij toepassing op grotere schaal moet in eerste instantie gedacht worden aan een energie-opslagsysteem (KWO of BEO), systemen die enkel warmte onttrekken dreigen bij toepassing op grote schaal verzadigd te worden doordat de mogelijkheden tot natuurlijke regeneratie van de bodem limieten heeft.

Energiewinning en –opslag is bijgevolg te realiseren met twee basistechnologieën, zijnde grondwatersystemen en gesloten lussystemen. De grondwatersystemen kennen nogal wat restricties, vooral omwille van het ontbreken van voldoende productieve watervoerende lagen over Oost- en West-Vlaanderen. Gesloten lussystemen kunnen op horizontale en verticale wijze gerealiseerd worden. Voor energie-onttrekking uit de bodem via warmtepompen zit vooral de verticale sondes in de particuliere markt sterk

in de lift. Voor energieopslag is vooral het BEO-systeem (met verticale sondes) sterk in opmars (zowel naar gebruikstoepassing als naar geologische randvoorwaarden). Deze technologie kan op termijn een significante bijdrage leveren tot de Europese klimaatdoelstellingen, zoals blijkt uit een recente studie van VITO voor VEA.

Bij het ontwerp van de verticale gesloten lussystemen (nodig voor zowel het merendeel van de particuliere warmtepompsystemen als voor een groot deel van de energieopslagsystemen) zijn de thermische karakteristieken van de bodem van groot belang. Deze bepalen de mate waarin energie kan overgedragen worden naar de bodem (thermische geleidbaarheid voor haalbare vermogens, thermische capaciteit voor haalbare opslaghoeveelheid). Het ontwerp van een grondwatersysteem (zoals KWO) is vooral gebaseerd op het haalbare grondwaterdebiet (zowel onttrekking als injectie), de impact van de thermische karakteristieken (vooral warmtegeleidbaarheid) is hierbij van minder belang.

Het inzicht in de thermische parameters van de complexe Vlaamse ondiepe ondergrond is nog onvoldoende ontwikkeld, zodat er heel wat onduidelijkheid is omtrent de te hanteren waardes bij het opzetten van een geothermisch project. Deze opdracht kan bijdragen tot een verhoogd inzicht in deze parameters en kan het niveau van de toekomstige ontwerpen opkrikken. Een eerste meetcampagne in 2004 bracht reeds een verhoogd inzicht in de thermische karakteristieken van een aantal veel voorkomende geologische formaties. Deze opdracht is erop gericht om de ontbrekende formaties te analyseren en een verfijning na te streven van de geschiktheidskaart naar het gebruik van verticale sondes voor energiewinning en –opslag.

2 LOCATIES

In April 2004 werd door de VITO in het kader van een raamopdracht de thermische geleidbaarheid van 15 belangrijke geologische formaties bepaald. Het betreft hierbij de formaties van Diest, Kasterlee, Bolderberg, Kempen, Brasschaat, Maastricht, Heers, Hannut, Sint-Huibrechts-Hern, Brussel, Boom, Kortrijk, Maldegem, Tielt en Gentbrugge. Op basis van dit rapport werd reeds een eerste zeer sumiere “geschiktheidskaart” voor koude-warmte opslag in de ondergrond opgesteld.

Het huidige project wenst de bovenstaande database uit te breiden door de bepaling van de thermische geleidbaarheid van 10 andere nog niet eerder onderzochte formaties. Op deze manier kan een goed inzicht bekomen worden in de thermische geleidbaarheid van de ondiepe ondergrond van Vlaanderen, zodanig dat het ook mogelijk moet worden een meer verfijnde geschiktheidskaart op te stellen van de Vlaamse ondergrond voor koude-warmte opslag en boorgatenergiewinning. Op deze geschiktheidskaarten kan ook aangegeven worden of de lagen zeer geschikt dan wel conditioneel plaatselijk geschikt zijn (bv. wegens het mogelijk voorkomen van karstverschijnselen).

De eigenlijke locaties dienden aan een aantal criteria te voldoen om geselecteerd te worden. Belangrijkste voorwaarde was de aanwezigheid van een voldoende dik pakket van één en dezelfde formatie. Om een goede meting te kunnen realiseren is het aangewezen dat een warmtewisselaar van minimaal 25 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. Er is steeds gestreefd naar locaties waar de desbetreffende formatie dagzoomd (aan de oppervlakte komen) zodat de warmtewisselaar volledig in de betrokken formatie terecht komt. Niet voor alle formaties was een dik genoeg pakket aanwezig, waardoor er ook onderliggende formaties werden meegemeten (minimale lengte wisselaar 25 m), of dagzoomde de te meten formatie niet waardoor ook een dunne bovenliggende formatie werd gemeten. Dit is echter gecorrigeerd met temperatuursmetingen voor en na de thermische respons test.

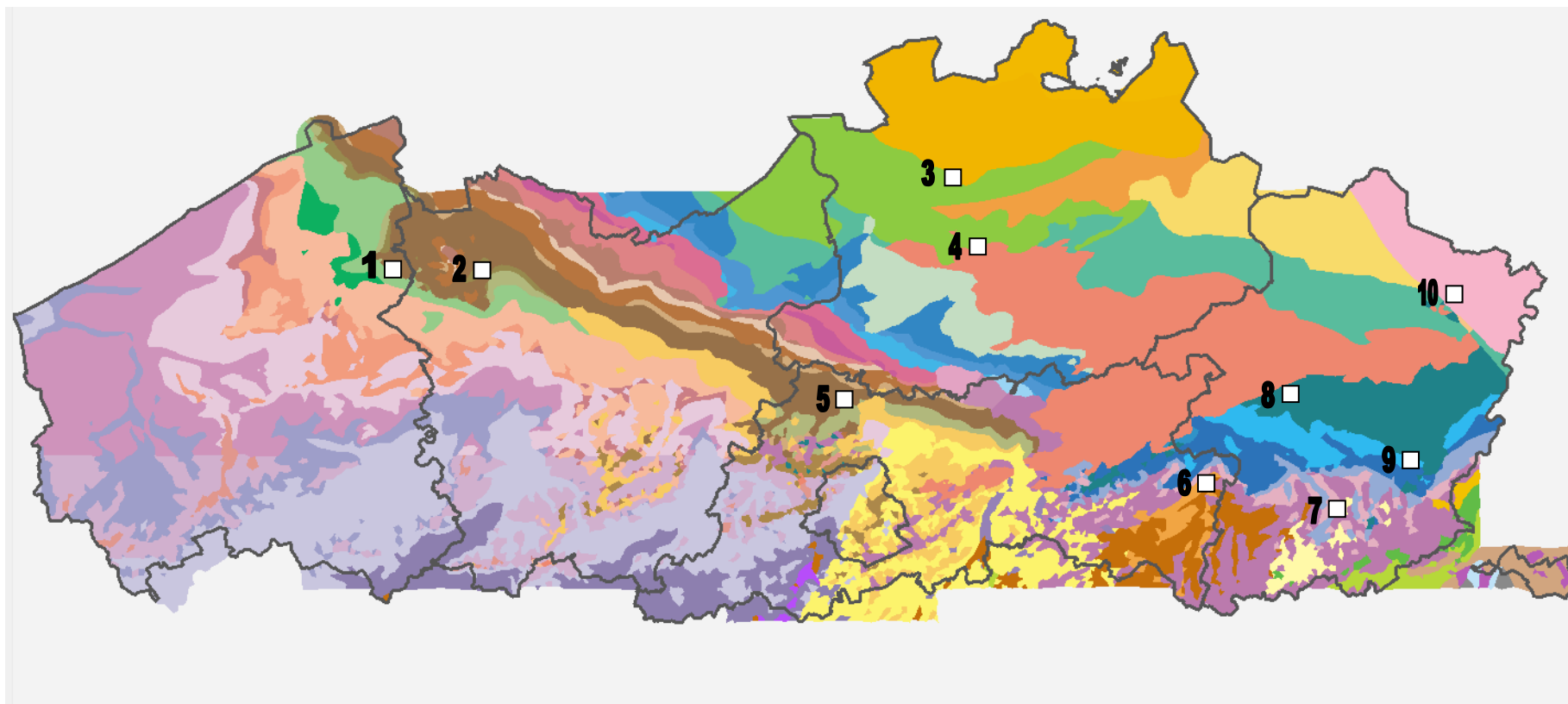
In een zoektocht naar de verschillende formaties is tevens rekening gehouden met de dikte van de quartaire afzettingen. Dit zijn de laatste afzettingen (laatste 1,8 miljoen jaar) die als een meestal dunne mantel de vroegere, oudere formaties (uit het Tertiair) bedekken. Op de meeste plaatsen is de dikte van de afzettingen beperkt (enkele meters dik), op sommige plaatsen kan dit echter oplopen tot meer dan 25 m.

De meeste metingen focussen zich op de tertiaire afzettingen. Dit zijn de afzettingen die in de chronostratigrafie gecatalogeerd zijn onder Neogeen (Pliocen, Mioceen) en Paleogeen (Oligoceen, Eoceen en Paleoceen). De specifieke geologische eenheden dewelke bemeten dienen te worden zijn vastgelegd in het beschrijvend bestek VLA10-4.2 :

- Formatie van Lillo
- Formatie van Berchem
- Formatie van Lede
- Formatie van Aalter
- Formatie van Voort/Eigenbilzen
- Formatie van Tienen
- Formatie van Borgloon
- Formatie van Bilzen
- Maasgrind
- Quartair van de Vlaamse Vallei

De verschillende tertiaire formaties en locaties, dewelke aan een thermische respons test onderworpen zijn, zijn weergegeven op een overzichtskaart (Figuur 1). De 10 locaties zijn zodanig gekozen dat de formaties die ze vertegenwoordigen, samen met de 15 voorheen bemeten formaties, een goed overzicht geven van de thermische geleidbaarheid van de ondiepe Vlaamse ondergrond.

Op de overzichtskaart worden de dagzoomende tertiaire formaties 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 1: Overzicht locaties voor 'thermische respons test' op Tertiairkaart Vlaanderen (bron DOV)

Legend



Figuur 2: Legende bij Figuur 1 – verschillende formaties - leden

Een overzicht van de geselecteerde locaties en de bijhorende formatie wordt gegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Overzicht locatie boringen en formatie

Nr.	Boring	Plaats	Coördinaten			Diepte [m]	Formatie
			x	y	z		
1	VLA10-4.2-B1	Beernem	79205	206316	15,1	25	Formatie van Aalter
2	VLA10-4.2-B2	Eeklo	92489	208363	7,3	24	Quartair van de Vlaamse Vallei
3	VLA10-4.2-B3	Brecht	163783	219445	14,4	50	Formatie van Lillo
4	VLA10-4.2-B4	Ranst	164867	208793	11,9	47	Formatie van Berchem
5	VLA10-4.2-B5	Meise	146800	186740	14,7	41	Formatie van Lede
6	VLA10-4.2-B6	Zoutleeuw	201553	172924	29,7	29	Formatie van Tienen
7	VLA10-4.2-B7	Borgloon	218713	167152	79,6	25	Formatie van Borgloon
8	VLA10-4.2-B8	Hasselt	214036	184484	29,5	28	Formatie van Voort-Eigenbilzen
9	VLA10-4.2-B9	Bilzen	231017	174422	50,0	28	Formatie van Bilzen
10	VLA10-4.2-B10	Bree	239179	201888	44,3	25	Maasgrinden

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.

3 BESCHRIJVING VAN THERMISCHE RESPONS TEST

3.1 Installeren van de verticale warmtewisselaars

Vooraleer de eigenlijke thermische respons 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 ongeveer 30 m (zie Figuur 3).



Figuur 3: spoelboring voor Albon-geleidbaarheid-meetcampagne

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 bestaan uit een dubbele U-vormige lus, gemaakt uit PE (polyethyleen 32 x 2,9 mm (PN16)), met een lengte tussen 15 en 50 meter. (zie Figuur 4). De buizen worden gevuld met water en onderaan de lus wordt een extra gewicht bevestigd om het inbrengen te vergemakkelijken. Om de 2 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: verticale warmtewisselaar

Na het inbrengen van de warmtewisselaars wordt het boorgat terug opgevuld. Hiervoor wordt er gebruik gemaakt van een thermisch verbeterde grout, Geotherm-x GR. Deze grout zal er voor zorgen dat het boorgat voldoende is afgedicht volgens de voorschriften van de milieuvergunningdiensten naar doorlatendheid ($k - 1 \times 10^{-10}$ m/s), en toch een voldoende thermische geleidbaarheid heeft ($\lambda - 2,0$ W/mK).

Bij uitzondering werd op twee locaties de boormethode aangepast aan de specifieke situatie van de ondergrond. Dit was het geval in Zoutleeuw en in Bree, waar geboord

werd in respectievelijk de formatie van Tienen en de Maasgrinden. 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.

3.2 Meetwagen

Om dergelijke thermische responstest uit te voeren, werd een aanhangwagen (2 x 4 m) ter plekke gebracht. Hierin is alle apparatuur ondergebracht, bestaande uit een warmte-injectievoorziening (elektrische weerstand) en een hydraulisch circuit met volledige regelkring en data-logging (zie Figuur 5).



Figuur 5: Meetopstelling in aanhangwagen

Het hydraulische circuit bestaat uit een pomp, een debietregelaar en -meter, enkele elektrische verwarmingselementen en randapparatuur. De vertrek- en retourleiding van

het circuit worden naar buiten gebracht ter aansluiting van de verticale warmtewisselaar. De verschillende meetsignalen (temperaturen en debieten) worden verwerkt door de datalogger. 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 verliesstroomschakelaar).

3.3 Meetmethode

Voor de uitvoering van thermische response test werd een werkwijze opgesteld om een uniforme en betrouwbare uitvoering te garanderen. Hierbij wordt een continue warmtestroom aan de verticale warmtewisselaar aangelegd. Hiertoe wordt het debiet op een constante waarde ingesteld, in het hydraulisch circuit gerealiseerd door een zeer nauwkeurige elektromagnetische debietsmeting (0,2% nauwkeurig) en een equiprocentuele regelklep. De verwarmingselementen zijn continu regelbaar om te komen tot een constant temperatuurverschil over het in- en uitgaande water van de verticale warmtewisselaar. Dit is nodig om de gegevens via de verschillende analysemodellen nauwkeurig te verwerken tot betrouwbare resultaten.

De uitvoering van de test dient continu en minimaal 40 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 ook het temperatuurverschil tussen de vertrek- en retourleiding constant 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 = 15/13 ; na 69 uur vertrek/retour = 18/16). Het is de curve van deze temperatuurstijging die belangrijk is voor de bepaling van de λ -waarde. Deze warmtegeleidingcoëfficiënt 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 temperatuurseenheid. Deze waarde is vooral functie van de waterinhoud en minder van het ondergrondtype en is voor waterverzadigde 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 fluidum in de verticale warmtewisselaar en de boorgatwand verloopt. Er wordt steeds gestreefd naar een zo laag mogelijke R_b-waarde.

Door toepassing van de gepaste verwerkingsmethode, met name de ‘Lijnbrontheorie’, kan uit het temperatuurantwoord van de vloeistof op de aangelegde warmte-input de effectieve warmtegeleidbaarheid van de bodem en de warmte-overgangsweerstand van de vloeistof naar de sedimenten (de zogenaamde boorgatweerstand) berekend worden. De warmtegeleidingscoëfficiënt van de boorgatvulling zelf kan hieruit niet rechtstreeks afgeleid worden. Deze heeft uiteraard wel een zeer belangrijke invloed op de boorgatweerstand.

Het verloop van de gemiddelde vloeistoftemperatuur kan volgens de lijnbrontheorie als volgt beschreven worden :

$$T_{\text{vl-gemid}}(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \frac{q}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4a}{r^2}\right) - \gamma \right] + q.R_b + T_0$$

met

$T_{\text{vl-gemid}}$: Gemiddelde vloeistoftemperatuur	[K]
λ	: Warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem	[W/(mK)]
q	: Specifieke thermische belasting (vermogen)	[W/m]
a	: Temperatuurvereffeningscoëfficiënt van de bodem	[m ² /s]
r	: Boorgatradius	[m]
R_b	: Boorgatweerstand	[K/(W/m)]
γ	: Euler-constante	[-]
T_0	: Ongestoorde bodemtemperatuur	[K]
t	: Tijd	[s]

Uit bovenstaande vergelijking kan afgeleid worden dat er een eenvoudige lineaire samenhang bestaat tussen de vloeistoftemperatuur en de logaritmische tijd, met name:

$$T_{\text{vl-gemid}}(t) = k \cdot \ln(t) + m$$

Hierbij zijn k en m constanten. Indien de gemiddelde vloeistoftemperatuur in de sonde over de logaritmische tijd wordt uitgezet, dan kan de warmtegeleidingcoëfficiënt van de bodem uit de stijging (k) van de rechte afgeleid worden :

$$\lambda = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot k}$$

Na afleiding van de warmtegeleidingcoëfficiënt λ van de bodem, kan de thermische weerstand R_b tussen de vloeistof in de sonde en de boorgatwand af geleid worden :

$$R_b = \frac{1}{q} \left[T_{\text{vl-gemid}}(t) - T_0 \right] - \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \right]$$

3.4 Lambda-correctie

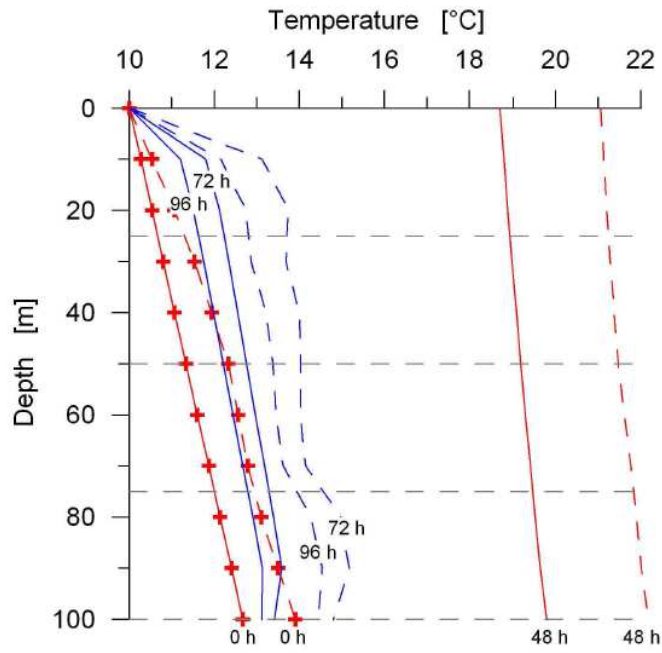
Innovatieve analyse

De meting en analyse van de resultaten van een thermische respons test geven een gemiddelde waarde van de geleidbaarheid van de formaties waarin de sondes geïnstalleerd werden. Doordat de gemeten formaties bij deze meetcampagne, in tegenstelling tot de vorige campagne in 2004, allen relatief dun zijn en niet steeds aan de oppervlakte voorkomen, is er bij de meeste metingen een uitgemiddelde waarde voor lambda gemeten over verschillende formaties of met inbegrip van een significant deel quartaire afzettingen.

Een nieuwe analysetechniek dringt zich op om deze problematiek te omzeilen. Hiertoe is er na afloop van de conventionele warmte-injectietest gebruik gemaakt van een temperatuursensor om een recuperatietest uit te voeren. Deze recuperatie zal immers in functie van lokale geleidbaarheid sneller of trager verlopen. Zo kan er een verschil in temperatuur tussen de verschillende lagen gemeten worden in functie van de regeneratiesnelheid van de bodem. Deze recuperatiemeting dient handmatig te gebeuren door op regelmatige tijdstippen op verschillende dieptes de temperatuur te meten via een mini-sonde in de U-lus, een aantal uren recuperatie kunnen volstaan terwijl een langdurige meting de nauwkeurigheid zal verhogen.

De temperatuurdata wordt geëvalueerd bij middel van een numerische simulatie, waarbij de resultaten het verticale profiel van de thermische karakteristieken van de bodem weergeven. Onderstaande figuur geeft de evolutie van de temperatuur in de diepte voor twee bodemtypes (twee modellen van de bodem voorgesteld als volle versus onderbroken lijn) voor de test (0h), na de warmte-injectie (na 48h) en na regeneratie (na 72 en 96h). Hierbij wordt de evaluatie uitgevoerd met een (relatief groot) interval van 25m, waarbij het tweede model een duidelijk verschil in geleidbaarheid toont ten opzichte van het eerste model waarin de recuperatie van de bodemtemperatuur vrij gelijkmatig verloopt (en de geleidbaarheid constant is in de diepte).





z [m]	Model 1		Model 2	
	λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	$\rho \cdot c$ [$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$]	λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	$\rho \cdot c$ [$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$]
0 m – 25 m	3.0	4.2	1.5	4.2
25 m – 50 m	3.0	4.2	2.0	4.2
50 m – 75 m	3.0	4.2	3.5	4.2
75 m – 100 m	3.0	4.2	2.0	4.2

3.5 Resultaten

De resultaten van de meetcampagne zijn samengevat in Tabel 2, waarbij ook een minimum en maximumwaarde voor de geleidbaarheid is aangegeven. Deze houden rekening met eventuele meet- en rekenfouten waardoor er een vork ontstaat waartussen de warmtegeleidbaarheid van de desbetreffende Formatie op die lokatie zich bevindt.

Tabel 2: Overzicht van de resultaten van de meetcampagne

Formatie	Plaats	Diepte boring (m)	λ_{gemeten} (W/mK)	λ_{min} (W/mK)	λ_{max} (W/mK)
Formatie van Aalter	Beernem	25	2,61	2,56	2,82
Quartair van de Vlaamse Vallei	Eeklo	25	2,41	2,33	2,57
Formatie van Lillo	Brecht	50	2,31	2,21	2,44
Formatie van Berchem	Ranst	50	1,74	1,7	1,93
Formatie van Lede	Meise	30	2,33	2,28	2,52
Formatie van Tienen	Zoutleeuw	30	1,99	1,89	2,1
Formatie van Borgloon	Borgloon	25	2,33	2,26	2,5
Formatie van Voort-Eigenbilzen	Hasselt	30	1,80	1,73	1,9
Formatie van Bilzen	Bilzen	30	2,47	2,35	2,59
Maasgrinden	Bree	25	2,67	2,47	2,74

Elke boring zal kort samengevat worden. Per locatie wordt eerst een algemene lithologische omschrijving gegeven. 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. Tenslotte zal het resultaat van de test worden vermeld.

Formatie van Aalter, Beernem

De basis van de formatie van Aalter bestaat uit gauconietrijk kleiig zand. Daarop volgt een pakket klei-, zand- en zandsteenlagen waarin fossielen voorkomen. De top van de formatie bestaat uit fossielrijk glauconiethoudend fijn zand.

Tabel 3 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 25 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 3: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 25 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	3,0	m	Fijn bruingeel zand met leem
3,0	m	12,0	m	Geel groen glauconiethoudend zand
12,0	m	18,0	m	Grijze klei met fossielen
18,0	m	24,0	m	Fossielrijk glauconiethoudend zand
24,0	m	25,0	m	Zandige klei met schelpen

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 4:

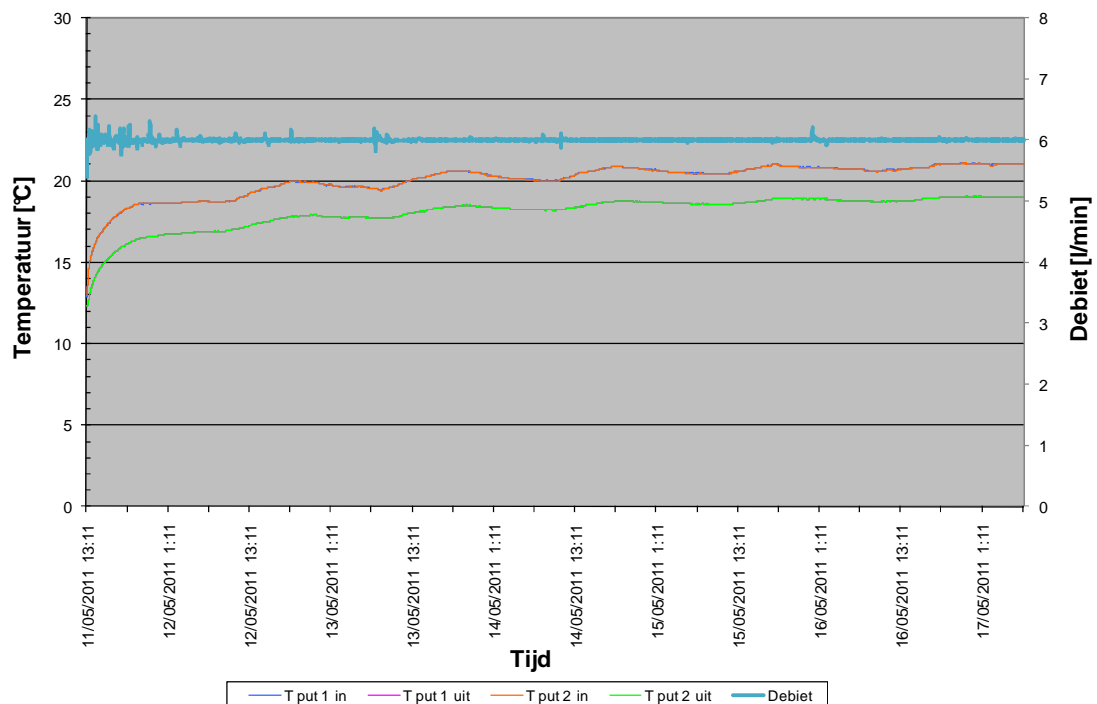
Tabel 4: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 25 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0	m	3,0	m	Quartaire afzettingen
3,0	m	12,0	m	Lid van Oedelem, Formatie van Aalter
12,0	m	18,0	m	Lid van Beernem, Formatie van Aalter
18,0	m	24,0	m	Zand van Aalterbrugge, Formatie van Aalter
24,0	m	25,0	m	Formatie van Gentbrugge

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 waarde van 3 W/mK.

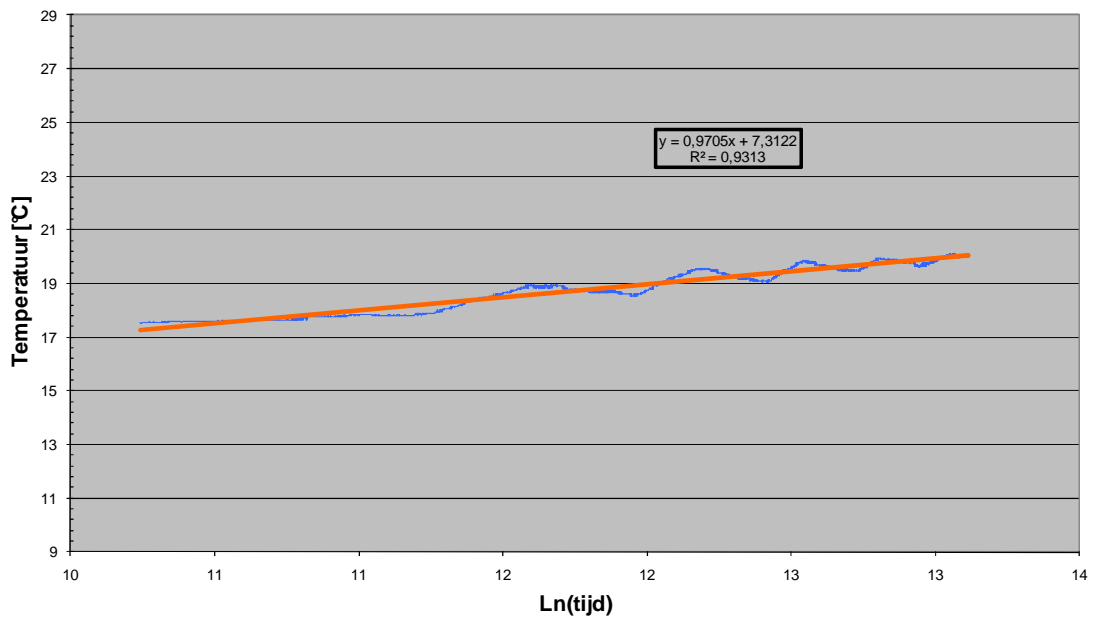
Als voorbeeld zijn hier enkele grafieken weergegeven. Figuur 6 geeft het temperatuursverloop en het debiet weer gedurende de test.



Figuur 6: in- en uitgaande vloeistoftemperaturen

Indien we nu de gemiddelde vloeistoftemperatuur uitzetten op een logaritmische schaal bekomen we een grafiek waaruit de warmtegeleidingcoëfficiënt (of λ -waarde) afgeleid wordt. De richtingscoëfficiënt is een maat voor de warmtegeleidingscoëfficiënt.

Figuur 7 toont dit verband aan.

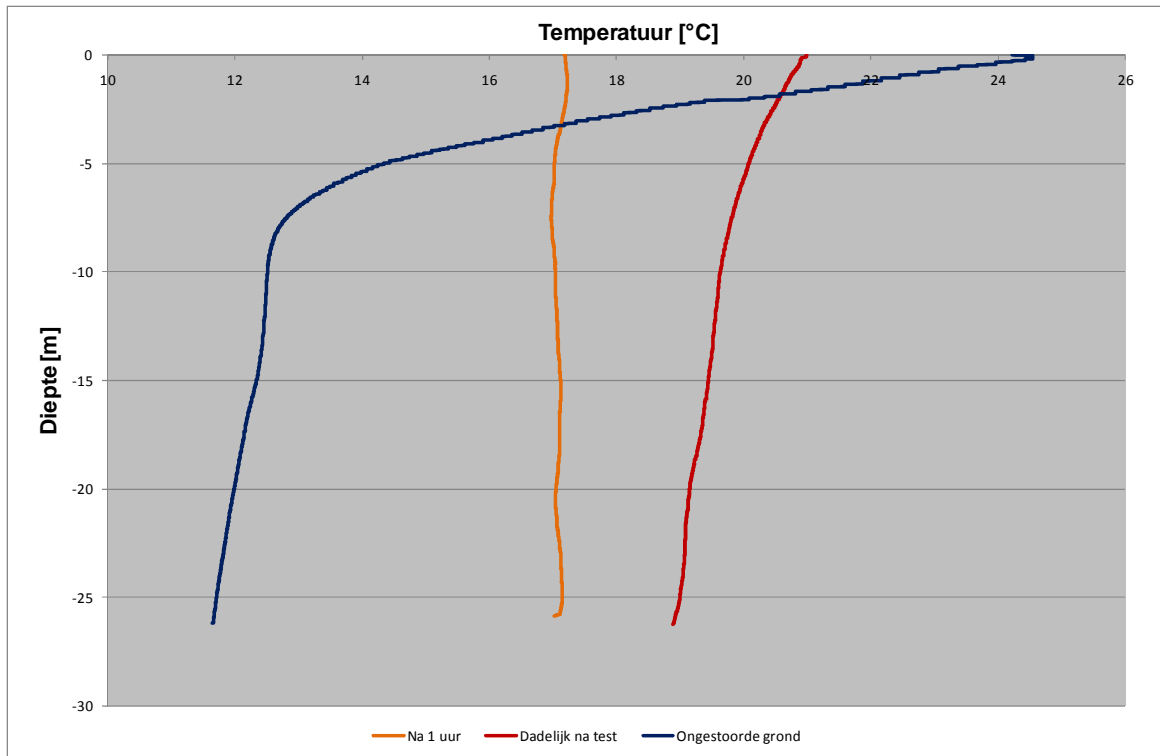


Figuur 7: Gemiddelde vloeistoftemperatuur op logaritmische schaal met lineaire regressie

Uit de meetresultaten blijkt dat de warmtegeleidingscoëfficiënt voor het boorgat 2,71 W/(mK) bedraagt. Omdat het boorgat bestaat uit meerdere formaties is er nog een correctie uitgevoerd om de warmtegeleidingscoëfficiënt specifiek voor de gevraagde formatie te berekenen.

Hiervoor zijn er temperatuurmetingen gebeurd voor en na de test. Figuur 8 geeft een overzicht van deze metingen.

Met deze gegevens kan er een correctie uitgevoerd worden op het resultaat van de TRT-test om zo een nauwkeuriger beeld te hebben van de “te meten” formatie. Wanneer deze correctie wordt uitgevoerd op de Formatie van Aalter bekomen we een warmtegeleidingscoëfficiënt van 2,61 W/mK.



Figuur 8: Temperaturen in de bodem voor en na de test

Quartair van de Vlaamse Vallei, Eeklo

Zand uit de Vlaamse Vallei heeft een sterk afwisselende samenstelling: van middelmatig tot fijn zand. Variërend gehalte aan silt en klei. Dunne kleilagen zijn mogelijk. Het glauconietgehalte is meestal aan de lage kant.

Tabel 5 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 24 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 5: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 24 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	23,0	m	Afwisselend zand, silt, klei, laag glauconiet gehalte en schelpen
23,0	m	24,0	m	Grijsgroene klei, schelpen

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 6:

Tabel 6: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 24 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0	m	23,0	m	Quartaire afzettingen
23,0	m	24,0	m	Formatie van Maldegem

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 gecorrigeerde lambda-waarde voor het Quartair van de Vlaamse Vallei van 2,41 W/mK.

Formatie van Lillo, Brecht

De Formatie van Lillo bestaat voornamelijk uit groene tot grijsbruine, glauconiethoudende fijne zanden met een afwisselend kleigehalte en schelpengruis. Aan de basis van de formatie komen meer schelpen voor dan aan de top, die bovendien kleiiger is. De formatie wordt onderverdeeld in vijf leden die zowel boven elkaar als vertand kunnen voorkomen:

- Zanden van Zandvliet, glauconiethoudend zand;
- Zanden van Merksem, glauconiet- en fossielhoudend zand;
- Zanden van Kruisschans, zand met kleilenzen;
- Zanden van Oorderen, schelpenhoudend zand met kleilagen;
- Zanden van Luchtbal, schelpenhoudend zand.

Tabel 7 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 50 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 7: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 50 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	16,0	m	Lichtgrijs, weinig glimmerhoudend zand
16,0	m	38,0	m	Bruingrijs matig fijn glauconiethoudend zand met brokjes kalkhoudende klei met schelpengruis en schelpenfragmenten
38,0	m	45,0	m	Donkergrijs/groen zand met schelpengruis en schelpenfragmenten
45,0	m	50,0	m	Groen, glauconiethoudend grof zand

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 8:

Tabel 8: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 50 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0	m	16,0	m	Quartaire afzettingen
16,0	m	38,0	m	Formatie van Lillo
38,0	m	45,0	m	Formatie van Kattendijk
45,0	m	50,0	m	Formatie van Diest

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 gecorrigeerde lambda-waarde voor de formatie van Lillo van 2,31 W/mK.

Formatie van Berchem, Ranst

De Formatie van Berchem kenmerkt zich door zwartgroene, glauconietrijke, micahoudende middelmatige zanden met plaatselijk grovere zones. Er komen kleiige lagen voor en de formatie is rijk aan fossielen, met name mollusken en foraminiferen.

Tabel 9 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 47 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 9: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 47 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	4,0	M	Kleihoudend bruingroen tot wit fijn zand
4,0	m	18,0	M	Groen glauconiethoudend fijn tot middelmatig zand
18,0	m	46,0	M	Fijn glauconiethoudend groen/zwart zand met mica
46,0	m	47,0	M	Donkergrijze klei met schelpen

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 10:

Tabel 10: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 47 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0	m	4,0	m	Quartaire afzettingen
4,0	m	18,0	m	Formatie van Diest
18,0	m	46,0	m	Formatie van Berchem
46,0	m	47,0	m	Formatie van Boom

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 gecorrigeerde lambda-waarde voor de formatie van Berchem van 1,74 W/mK.

Formatie van Lede, Meise

De Formatie van Lede bestaat uit grijs matig fijn tot fijn zand, kalkhoudend, soms met kalkzandsteenbanken. Aan de basis komt meestal een grindlaag voor. In niet-verweerde toestand is deze formatie makkelijk te herkennen aan de massale hoeveelheden fossielen: nummulieten.

Tabel 11 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 41 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 11: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 41 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	3,0	m	Bruingrijze klei, stenen, zandhoudend
3,0	m	18,0	m	Grijsgroene klei, harde lagen, zandhoudend
18,0	m	25,0	m	Grijsgroen kleihoudend zand
25,0	m	40,0	m	Grijsgroen zand, kleihoudend met grindlaag
40,0	m	41,0	m	Grijsgroene klei, weinig zandhoudend

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 12:

Tabel 12: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 41 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	3,0	m	Quartaire afzettingen
3,0	m	18,0	m	Lid van Asse, Formatie van Maldegem
18,0	m	25,0	m	Lid van Wemmel, Formatie van Maldegem
25,0	m	40,0	m	Formatie van Lede
40,0	m	41,0	m	Formatie van Gentbrugge

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 gecorrigeerde lambda-waarde voor de formatie van Lede van 2,33 W/mK.

Formatie van Tienen, Zoutleeuw

De Formatie van Tienen bestaat uit klei met bruinkoollaagjes en versteend hout, zand (soms schelpenbanken) en mergel. Er zijn in deze formatie belangrijke fossielen van gewervelde dieren gevonden.

Tabel 13 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 29 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 13: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 29 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	4,0	m	Bruine leem, zandhoudend
4,0	m	8,0	m	Bruin grof zand, kleine stenen
8,0	m	13,0	m	Groengrijs grof zand, kleihoudend, kleine stenen
13,0	m	28,0	m	Bruingroen tot groene slappe klei met stenen
28,0	m	29,0	m	Groenzwart fijn zand, kleihoudend

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 14:

Tabel 14: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 29 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	13,0	m	Quartaire afzettingen
13,0	m	28,0	m	Formatie van Tienen
28,0	m	29,0	m	Formatie van Hannut

Voor zuivere kleilagen vindt men in de literatuur waarden terug van 0,9 tot 2,3 W/mK met een voorkeur voor 1,6 W/mK.

De in-situ test gaf een gecorrigeerde lambda-waarde voor de formatie van Tienen van 1,99 W/mK.

Formatie van Borgloon, Borgloon

De Formatie van Borgloon kenmerkt zich door een basis van groene en grijze klei, gevolgd door een afwisseling van klei- en zandlagen. De top is een laag gelig zand waarin veel schelpfragmenten voorkomen.

Tabel 15 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 25 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 15: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 25 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	4,0	m	Bruingelig zand, kleihoudend
4,0	m	15,0	m	Gelig tot geelgroen fijn zand met kleilagen
15,0	m	25,0	m	Grijze klei met zandlagen, zandige klei met mica

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 16:

Tabel 16: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 25 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	4,0	m	Quartaire afzettingen
4,0	m	15,0	m	Formatie van Borgloon
15,0	m	25,0	m	Formatie van St-Huibrechts Hern

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 afwisselend klei en zandlagen hebben zou de warmtegeleidbaarheid in de richting van waterverzadigde zanden moeten gaan (1,7 tot 5 W/mK).

De in-situ test gaf een gecorrigeerde lambda-waarde voor de formatie van Borgloon van 2,33 W/mK.

Formatie van Voort-Eigenbilzen, Hasselt

Deze Formatie is eigenlijk een combinatie van de Formatie van Voort en de Formatie van Eigenbilzen. Omdat deze formaties zeer moeilijk van mekaar zijn te onderscheiden en beide worden ingedeeld in de Rupel Groep, worden ze vaak als één Formatie aanzien.

De Formatie van Voort bestaat vooral uit grijzig tot groenig zeer glauconietrijk, kleilig, middelmatig zand. Deze zandlaag wordt soms afgewisseld met lagen groenige zandhoudende klei. Plaatselijk komen schelpenbanken of lagen klei met pyriet voor.

De Formatie van Eigenbilzen bestaat uit grijs tot grijsgroen, glauconiethoudend, kleilig fijn zand waarin fijne gelaagdheid en bioturbatie voorkomen. Mogelijk is er ook een weinig mica aanwezig. Aan de basis is de Formatie nog kleiiger.

Tabel 17 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 28 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 17: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 28 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	3,0	m	Bruin fijn zand, veenhoudend
3,0	m	11,0	m	Grijs fijn zand, veenhoudend
11,0	m	27,0	m	Groengrijs fijn zand, kleihoudend
27,0	m	28,0	m	Groengrijze klei

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 18:

Tabel 18: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 28 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	11,0	m	Quartaire afzettingen
11,0	m	27,0	m	Formatie van Voort-Eigenbilzen
27,0	m	28,0	m	Formatie van Boom

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 gecorrigeerde lambda-waarde voor de formatie van Voort-Eigenbilzen van 1,8 W/mK.

Formatie van Bilzen, Bilzen

De basis van deze Formatie bestaat uit geel tot bruinachtig, middelmatig zand, licht kleihoudend met soms grote schelpen. Glauconiet- en micahoudend. Onderaan is het zand kleiiger.

Aan de basis van de Formatie bevindt zich een grindlaag met zwarte, platte sillexkeien met daarboven bleekgrijs soms bruinachtig halffijn tot grof licht kleiigzand. Mica- en glauconiethoudend (Lid van Berg). Daarboven een laag fossielrijke en septariahoudende groenbruine tot grijswitte zandige klei met horizontale bedding (Lid van Kleine Spouwen). Tenslotte een laag grijswit tot geel middelmatig zand met kleilaagjes. Soms komt in het midden ook een beetje grind voor (Lid van Kerniel).

Tabel 19 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 28 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 19: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 28 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	12,0	m	Bruingrijs tot grijsgroen zand, kleihoudend, schelpen en stenen
12,0	m	17,0	m	Grijswit zand met een weinig klei
17,0	m	25,0	m	Grijze klei, zandhoudend met kleine stenen
25,0	m	28,0	m	Bruingrijze zand, kleihoudend met schelpen

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 20:

Tabel 20: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 28 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	11,0	m	Quartaire afzettingen
11,0	m	17,0	m	Lid van Kerniel, Formatie van Bilzen
17,0	m	25,0	m	Lid van Kleine Spouwen, Formatie van Bilzen
25,0	m	28,0	m	Lid van Berg, Formatie van Bilzen

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. Aangezien er hier ook een kleilaag aanwezig is zal de warmtegeleidbaarheid in de richting van kleilagen moeten gaan (0,9 tot 2,3 W/mK).

De in-situ test gaf een gecorrigeerde lambda-waarde voor de formatie van Bilzen van 2,47 W/mK..

Maasgrinden, Bree

De Maasgrinden bestaan hoofdzakelijk uit grind afgezet door de Maas en zijn gekenmerkt door een relatief hoog aandeel kalk- en vuursteencomponenten, en grof geelbruin zand.

Tabel 21 geeft een overzicht van de gelaagdheid van de bodem over de eerste 25 meter vastgesteld tijdens het boren.

Tabel 21: Overzicht van de gelaagdheid van de bodem (de eerste 25 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	6,0	m	Grof geel zand
6,0	m	12,0	m	Grof geel zand met kiezel
12,0	m	17,0	m	Grove kiezel
17,0	m	20,0	m	Grof zand met kiezel
20,0	m	25,0	m	Fijn tot middelmatig wit kwartzand

Deze beschrijving leidt tot de stratigrafische karakteristieken weergegeven in Tabel 22:

Tabel 22: Stratigrafische karakteristieken van de bodem (de eerste 25 meter)

Diepte				Omschrijving
Van		Tot		
0,0	m	6,0	m	Quartaire afzettingen
6,0	m	20,0	m	Maasgrinden
20,0	m	25,0	m	Formatie van Mol

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 gecorrigeerde lambda-waarde voor de Maasgrinden van 2,67 W/mK.

4 GESCHIKTHEIDSKAART VLAANDEREN

Om een indicatie te krijgen van welke gebieden binnen Vlaanderen in mindere of meerdere in aanmerking kunnen komen voor het onttrekken van warmte aan de ondergrond door middel van BEO, werd er een geschiktheidskaart aangemaakt. Deze kaart stelt de gemiddelde thermische geleidbaarheid van de ondergrond voor tot op een diepte van 100 meter of tot op de vaste rots. De hoeveelheid warmte die uit de aarde te onttrekken is, wordt enerzijds bepaald door de thermische geleidbaarheid van de ondergrond en anderzijds door de lengte of de diepte waarover de onttrekking gebeurt. Het diepte-interval voor BEO situeert zich klassiek tussen 50 en 150 meter. Vandaar dat een doorsnee diepte van 100 meter gebruikt werd om een idee te verkrijgen van de gemiddelde thermische geleidbaarheid die op elke locatie in Vlaanderen aangetroffen kan worden. Naast de thermische geleidbaarheid van de verschillende lagen die zich in de Vlaamse ondergrond bevinden, is er bijgevolg ook kennis nodig van de geografisch verbreiding en de dikte waarover deze pakketten zich in de ondergrond uitstrekken. Hiervoor werd enerzijds gebruik gemaakt van de geologische kaarten van Vlaanderen (DOV en GIS-Vlaanderen, 2001) en anderzijds van de diktemodellen van de verschillende onderscheiden eenheden uit de HCOV-kartering of het Vlaams Grondwater Model (Meyus et al., 2005, Van Campenhout et al., 2007). De diktemodellen van de verschillende lagen werden van boven naar onder bij elkaar opgeteld tot een cumulatieve dikte van 100 meter bereikt werd. Hierbij werd het onderste pakket steeds in dikte afgeknipt tot op deze maximale cumulatieve dikte. Vervolgens werd elk van deze diktemodellen vermenigvuldigd met zijn respectievelijke thermische geleidbaarheid. De resultaten van voorgaande bewerking werden bij elkaar opgeteld. En tenslotte werd deze som gedeeld door de maximale cumulatieve dikte van 100 meter of door de cumulatieve dikte tot op de vaste rots. Het eindresultaat geeft dan de gemiddelde thermische geleidbaarheid van de ondergrond weer.

Diktemodellen

De diktemodellen zijn afkomstig uit de HCOV-kartering. Deze modellen werden omgezet naar een rastergrootte van 200 bij 200 meter en werden afgerond tot op 0.25 meter. De verschillende lithostratigrafische eenheden, waarvoor een thermische geleidbaarheid gemeten werd, komen niet altijd onmiddellijk overeen met de hydrostratigrafische eenheden uit de HCOV-kartering. Vandaar dat er een aantal aanpassingen aan de diktemodellen diende te gebeuren. In sommige gevallen moesten eenheden bij elkaar opgeteld worden, in andere gevallen diende er een rekenkundig verschil gemaakt te worden tussen verschillende eenheden of diende er uit gegaan te worden van een veronderstelde gemiddelde dikte op basis van de literatuur en in nog andere gevallen werd een diktemodel geografisch opgedeeld in verschillende afzonderlijke eenheden. Onderstaande tabel geeft schematisch de bewerkingen met de diktemodellen van de HCOV-kartering weer. De getallen zijn de HCOV-codes zoals opgegeven in Meyus et al. (2000). De rode getallen wijzen op het gebruik van een gemiddelde dikte afkomstig uit de literatuur. De formaties waarvoor er geen eenvoudige relatie tot de HCOV-codering bestaat worden toegelicht:

1. Voor de verschillende Quartaire eenheden werd de totaaldikte van het Quartaire Aquifersysteem (0100) gebruikt. Een opdeling werd verkregen door gebruik te maken van de grenzen van de genetische grote structurele eenheden van het Quartair uit de kaart van Bogemans (2005). Hierbij werd er een onderscheid gemaakt in het dekzand, de loess, de Vlaamse Vallei inclusief kustvlakte en de Maas afzettingen inclusief terrasgronden van het Kempisch Plateau.
2. De Formatie van Lillo werd uitgebreid met de Formatie van Poederlee, de Formatie van Mol en de Kiezeloëliet Formatie. Hiervoor werd er gebruik gemaakt van de pakketten 0210 en 0230 van het Kempens Aquifersysteem, waarbij pakket 0231 (Zanden van Merksplas/Brasschaat) daaraan onttrokken werd.
3. De Formatie Kasterlee/Kattendijk komt overeen met HCOV-code 0240, de Pliocene kleiige laag, aangevuld met HCOV-code 0251, zijnde de bovenste zandige eenheid van het Miocene Aquifersysteem (0250)
4. De Formatie van Berchem valt samen met pakket 0254, zijnde de Zanden van Berchem en/of Voort. Aangezien de Zanden van Voort hoofdzakelijk voorkomen in de Roerdalslenk en het oostelijk deel van het Bekken van de Kempen liggen deze daar reeds op grote diepte. Met andere woorden het overgrote deel van de Zanden van Voort ligt onder de maximale cumulatieve diktegrens van 100 meter en kan bijgevolg binnen eenheid 0254 als verwaarloosbaar beschouwd worden. Vandaar dat deze eenheid geheel als de Formatie van Berchem kan aanzien worden.
5. De Formatie van Voort/Eigenbilzen komt voornamelijk overeen met de code 0256, zijnde het Zand van Eigenbilzen. Zoals uit voorgaand punt blijkt liggen de Zanden van Voort hoofdzakelijk onder de cut-off grens van het diktemodel.
6. De Formatie van Bilzen werd gereconstrueerd enerzijds uit eenheden 0410 en 0420 van het Oligoceen Aquifersysteem en anderzijds uit een diktemodel voor de eenheden 0431 en 0435, zijnde het Zand van Berg en het Zand van Ruisbroek, waarvoor een gemiddelde dikte van 6 meter verondersteld werd binnen het verbreidingsgebied van eenheid 0430.
7. De Formatie van Borgloon werd opgebouwd uit de Ruisbroek-Berg Aquifer (0430) en de Tongeren Aquitard (0440), waarbij eenheden 0431 en 0435 uit het vorige punt daaraan onttrokken werden.
8. De Formatie van Maldegem bestaat uit het Bartoon Aquitardsysteem (0500), aangevuld met een model met een gemiddelde dikte van 6 meter voor eenheid 0611, zijnde het Zand van Wemmel.
9. De Formatie van Lede is opgebouwd uit het pakket met HCOV-code 0610, verminderd met het model voor eenheid 0611 uit bovenstaand punt.

10. De Formatie van Gentbrugge bestaat uit de Paniseliaan Aquitard (0700) en de zandige afzettingen van het Onder-Paniseliaan, HCOV-code 0640.
11. Voor de Formatie van Tielt werden HCOV-eenheden 0800 en 0910 bij elkaar gevoegd, zijnde de Iepriaan Aquifer en het Silt van Kortemark.
12. De Formaties van Tienen en Hannut zijn niet eenduidig uit de bestaande modellen van de HCOV-kartering te distilleren. Uiteindelijk werd er gebruik gemaakt van het Landeniaan Aquifersysteem (1010) en de Landeniaan/Heersiaan Aquitard (1020). De som van de diktemodellen werd vervolgens geografisch opgedeeld in een model voor de Formatie van Tienen en een model voor de Formatie van Hannut. De opdeling is gebaseerd op de dagzoomgrenzen van de Formatie van Tienen uit de geologische kaart van Vlaanderen en een extrapolatie van deze verbreidinggrenzen naar de ondergrond gebaseerd op de kaart van Gulinck (1973).

Lithostratigrafie	Bewerking op diktemodellen uit HCOV-kartering
Dekzand	d0100 + geografische opdeling
Loess	d0100 + geografische opdeling
Vlaamse Vallei	d0100 + geografische opdeling
Maas grinden	d0100 + geografische opdeling
Kempen Klei	d0220
(Merksplas)/Brasschaat	d0231
Lillo/(Poederlee/Mol/Kiezeloöliet)	d0210 + d0230 - d0231
(Kattendijk)/Kasterlee	d0240 + d0251
Diest	d0252
Bolderberg	d0253
Berchem	d0254
Voort/Eigenbilzen	d0255 + d0256
Boom	d0300
Bilzen	d0410 + d0420 + d0431 + 0435
Borgloon	d0430 - d0431 - 0435 + d0440
(Zelzate)/Sint-Huibrechts-Hern	d0450
Maldegem	d0500 + d0611
Lede	d0610 - d0611
Brussel	d0620
Aalter	d0630
Gentbrugge	d0640 + d0700
Tielt	d0800 + d0910
Kortrijk	d0920
Tienen/Hannut	d1010 + d1020 + geografische opdeling
Heers/(Opglabbeek)	d1030
Maastricht	d1100
Rots	d1200 + d1300

Thermische geleidbaarheid

Voor het merendeel van de gekarteerde lithostratigrafische eenheden werd een thermische geleidbaarheid gemeten tijdens deze meetcampagne of tijdens de meetcampagne in 2004. Tabel 23 geeft een overzicht van deze gemeten waardes met ook telkens een minimum- en maximumwaarde, waarbij rekening wordt gehouden met eventuele meet- en rekenfouten. Hierbij is er ook een correctie gebeurd op de onrealistische waardes uit de meetcampagne van 2004 voor wat betreft de Formatie van Maastricht en de Formatie van Heers.

Tabel 23: Overzicht van gemeten geleidbaarheid

Formatie	λ_{gemeten} (W/mK)	λ_{min} (W/mK)	λ_{max} (W/mK)
Formatie van Diest	2,42	2,30	2,54
Formatie van Kasterlee	2,31	2,19	2,43
Formatie van Bolderberg	2,99	2,84	3,14
Formatie van Kempen	2,7	2,57	2,84
Formatie van Brasschaat	2,91	2,76	3,06
Formatie van Maastricht	2,3	2,19	2,42
Formatie van Heers	2,1	2,00	2,21
Formatie van Hannut	2,22	2,11	2,33
Formatie van St Huibrechts Hern	2,58	2,45	2,71
Formatie van Brussel	2,18	2,07	2,29
Formatie van Boom	2,18	2,07	2,29
Formatie van Kortrijk	1,66	1,58	1,74
Formatie van Maldegem	2,16	2,05	2,27
Formatie van Tielt	2,12	2,01	2,23
Formatie van Gent	3,26	3,10	3,42
Formatie van Aalter	2,61	2,56	2,82
Quartair van de Vlaamse Vallei	2,41	2,33	2,57
Formatie van Lillo	2,31	2,21	2,44
Formatie van Berchem	1,74	1,7	1,93
Formatie van Lede	2,33	2,28	2,52
Formatie van Tienen	1,99	1,89	2,1
Formatie van Borgloon	2,33	2,26	2,5
Formatie van Voort-Eigenbilzen	1,80	1,73	1,9
Formatie van Bilzen	2,47	2,35	2,59
Maasgrinden	2,67	2,47	2,74

Voor een aantal gekarteerde lithostratigrafische eenheden is de thermische geleidbaarheid nog niet gemeten. Bijgevolg dient er van een reeks veronderstellingen uitgegaan te worden om tot een gebieddekkende kaart voor Vlaanderen te komen. In eerste instantie wordt er verondersteld dat verschillende pakketten, die zich lithostratigrafisch op een gelijk niveau bevinden, een quasi gelijke thermische geleidbaarheid hebben. Dit natuurlijk in zoverre ze lithologisch gelijkaardig zijn. Zo wordt er van uitgegaan dat de Zanden van Merksplas een gelijkaardige thermische geleidbaarheid hebben als de Zanden van Brasschaat. Eenzelfde redenering geldt voor de Formatie van Lillo en de Formaties van Poederlee, Mol en Kiezeloëliet. Ook voor de Formaties van Kasterlee en Kattendijk werd dit toegepast. De Formatie van Zelzate kreeg een gelijkaardige thermische geleidbaarheid als de Formatie van Sint-Huibrechts-Hern. Tenslotte werd voor het gemak van het modelleren de thermische geleidbaarheid

van de Formatie van Heers naar onder doorgetrokken tot de Formatie van Opglabbeek. Beide formaties zijn niet geheel gelijk qua lithologie. Maar de Formatie van Opglabbeek heeft slechts een zeer beperkte verbreiding in het oosten van het Bekken van de Kempen. Ze dagzoomt nergens en wordt steeds bedekt door de Formaties van Heers, Hannut en Sint-Huibrechts-Hern. Bijgevolg bevindt het overgrote deel van de Formatie van Opglabbeek zich snel onder de maximale cumulatieve diktegrens van 100 meter. Ze draagt dan ook weinig of niet bij tot het uiteindelijke kaartbeeld.

Het jongste geologische pakket, het Quartair, is zeer heterogeen van aard. Er zijn zowel in lithologie als in dikte sterke variaties op korte afstand. Om dit pakket toch enigszins van een bruikbare structuur te voorzien voor het modelleren, werd het geheel opgedeeld in de grote genetische eenheden volgens Bogemans (2005); namelijk het dekzandgebied, het loessgebied, het gebied van de Vlaamse Vallei en het gebied met de Maasafzettingen. Voor de Vlaamse Vallei en de Maasafzettingen werden de thermische geleidbaarheid gemeten, voor het dekzand en de loess evenwel nog niet. Bij het toekennen van een thermische geleidbaarheid aan deze 2 pakketten werd er gezocht naar lithologisch gelijkaardige lagen. Hierbij werd getracht lagen te kiezen met een zelfde korrelgrootte. Zo werd er voor het dekzand een thermische geleidbaarheid verondersteld gelijkaardig aan het Zand van Lede en voor de loess een thermische geleidbaarheid gelijkaardig aan de Formatie van Eigenbilzen.

Geschiedskaart

Naast de kaart met de gemiddelde thermische geleidbaarheid over een diepte van 100 meter of tot op de vaste rots, werden ook kaarten aangemaakt met de maximale en de minimale gemiddelde thermische geleidbaarheid. Deze zijn gebaseerd op de gemeten maximale en minimale thermische geleidbaarheid van de verschillende onderzochte formaties. Het kaartbeeld wordt hieronder summier besproken.

De kaart is opgedeeld in kleurvlakken van blauw naar rood, waarbij blauw een lage thermische geleidbaarheid weergeeft en rood een hoge. De kleurvlakken zijn afgelijnd met contouren. Deze contouren hebben een equidistantie van 0.1 W/mK. Elke kleursprong stelt bijgevolg een verschil in thermische geleidbaarheid van 0.1 W/mK voor. De minimale gemiddelde thermische geleidbaarheid over een diepte van 100 meter bedraagt 1.6 W/mK, de maximale 3.0 W/mK.

Het meest opvallende element in de kaart is het grote verschil in thermische geleidbaarheid van de ondergrond tussen het zuiden en het noorden van Vlaanderen. Hierin komt duidelijke de invloed van de lithologie op de thermische geleidbaarheid tot uitdrukking. De ondergrond in het zuiden bestaat voornamelijk uit kleiige sedimenten (afzettingen van de Ieper Groep), terwijl deze in het noorden hoofdzakelijk opgebouwd is uit zandige sedimenten (afzettingen van het Mioceen en Pliocceen in het oosten en afzettingen van het Midden en Laat Eoceen in het westen). De hoogste thermische geleidbaarheid wordt aangetroffen op het Kempisch Plateau. Over de volledige cumulatieve dikte van 100 meter wordt er hier hoofdzakelijk een opeenvolging van zandige sedimenten aangetroffen. De laagste thermische geleidbaarheid daarentegen wordt aangetroffen in de Westhoek. De kleien van de Ieper Groep dagzomen hier en komen er met een grote dikte in de ondergrond voor.

In het noorden wordt er ter hoogte van Herentals, Lier, Antwerpen en het Waasland binnen het gebied met hoge thermische geleidbaarheid een zone met relatief gezien

eerder lage thermische geleidbaarheid aangetroffen. Dit is het gevolg van de aanwezigheid van de Formatie van Berchem boven de Formatie van Boom. Voor beide pakketten werd een lage thermische geleidbaarheid gemeten. Enerzijds bestaat de Formatie van Boom uit klei en anderzijds zijn de Zanden van Berchem zeer glauconietrijk. Voor zowel klei als glauconiet (wat op zich ook een kleimineraal is) wordt klassiek een lage thermische geleidbaarheid gemeten. Aan de zuidoostelijke zijde wordt deze zone afgeboord door de Formatie van Diest. Deze formatie heeft er een getijdengeul gesneden doorheen de Boomse Klei, waardoor de Zanden van Diest rechtstreeks op de Zanden van Berg, de Zanden van Sint-Huibrechts-Hern en de Zanden van Brussel komen te liggen. Deze opeenvolging van zandige sedimenten zorgt bijgevolg opnieuw voor een hoge thermische geleidbaarheid.

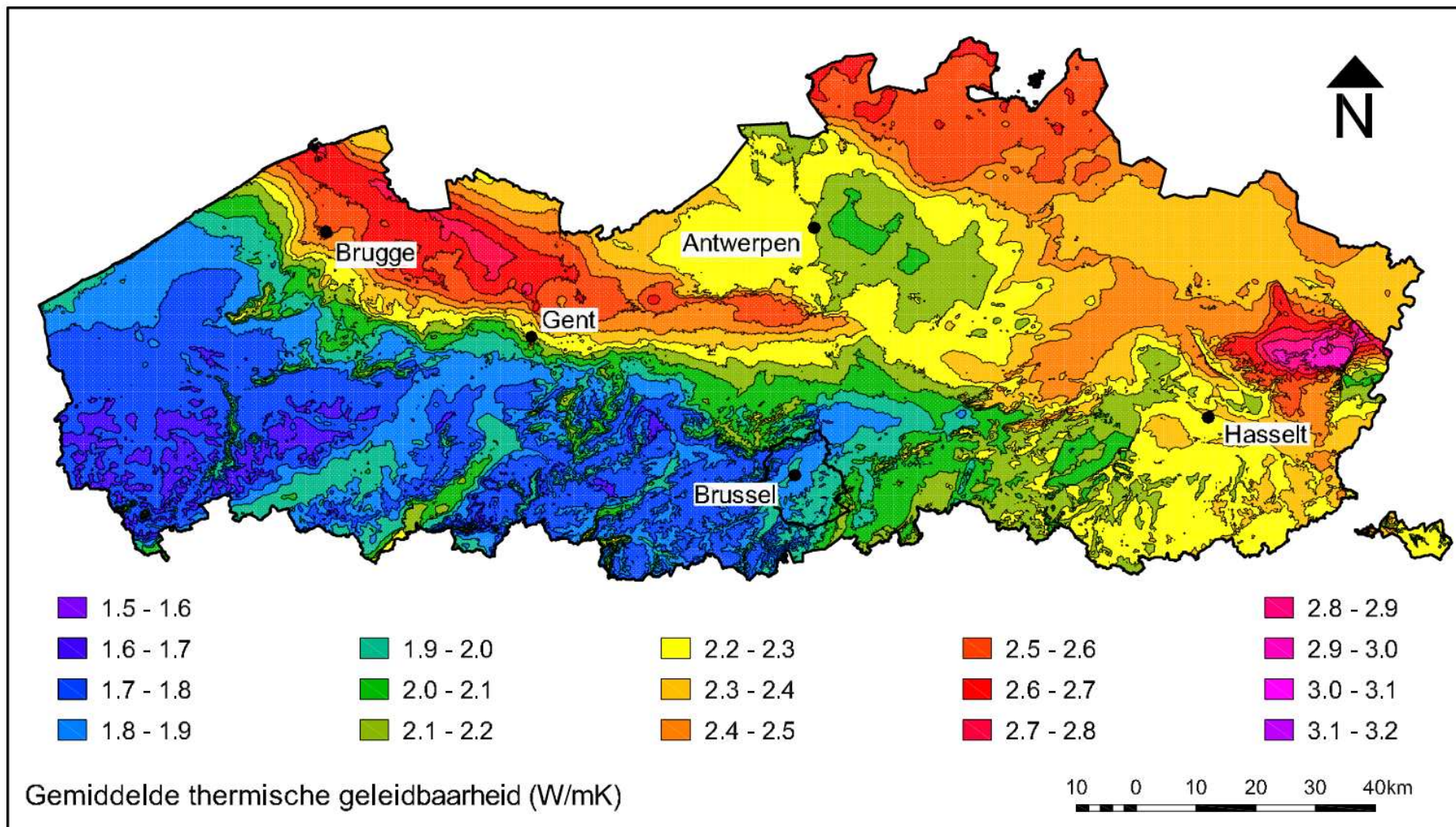
Het gebied met lage thermische geleidbaarheid in het zuiden van Vlaanderen wordt, ter hoogte van de Zenne, naar het oosten toe afgeboord door een zone met relatief gezien hogere waarden voor de thermische geleidbaarheid. Op deze plaats snijden de Zanden van Brussel zich in en zelfs door de kleien van de Ieper Groep. De Ieper Groep komt er bijgevolg slechts met een gereduceerde dikte voor. Nog verder naar het oosten verdwijnen deze kleiige sedimenten helemaal en worden de siltige en mergelige afzettingen van de Formaties van Hannut en Heers aangetroffen. Zowel de Formatie van Brussel als de Formaties van Hannut en Heers hebben een hogere thermische geleidbaarheid dan de kleien van de Ieper Groep, die hier voornamelijk bestaat uit de Formaties van Kortrijk.

In het zuidwesten van Vlaanderen binnen het gebied met lage thermische geleidbaarheid komen er kleinere zones voor met relatief gezien iets hogere waarden voor de thermische geleidbaarheid. Enerzijds worden deze kleinere zones aangetroffen ter hoogte van de toppen van de interfluvia, anderzijds worden ze juist teruggevonden in de dalen van de grotere waterlopen. De hoogste toppen van de interfluvia worden er meestal gevormd door zandige afzettingen van de Formaties van Gentbrugge, Lede en Diest. De dalen van de grotere waterlopen behoren meestal tot het dalstelsel van de Vlaamse Vallei. Dit dalstelsel is hoofdzakelijk opgevuld met zandige sedimenten die diktes tot 30 meter en meer kunnen bereiken. In beide gevallen gaat het dus voornamelijk om zand waarvoor een hogere thermische geleidbaarheid gemeten wordt dan voor de omliggende klei van de Ieper Groep.

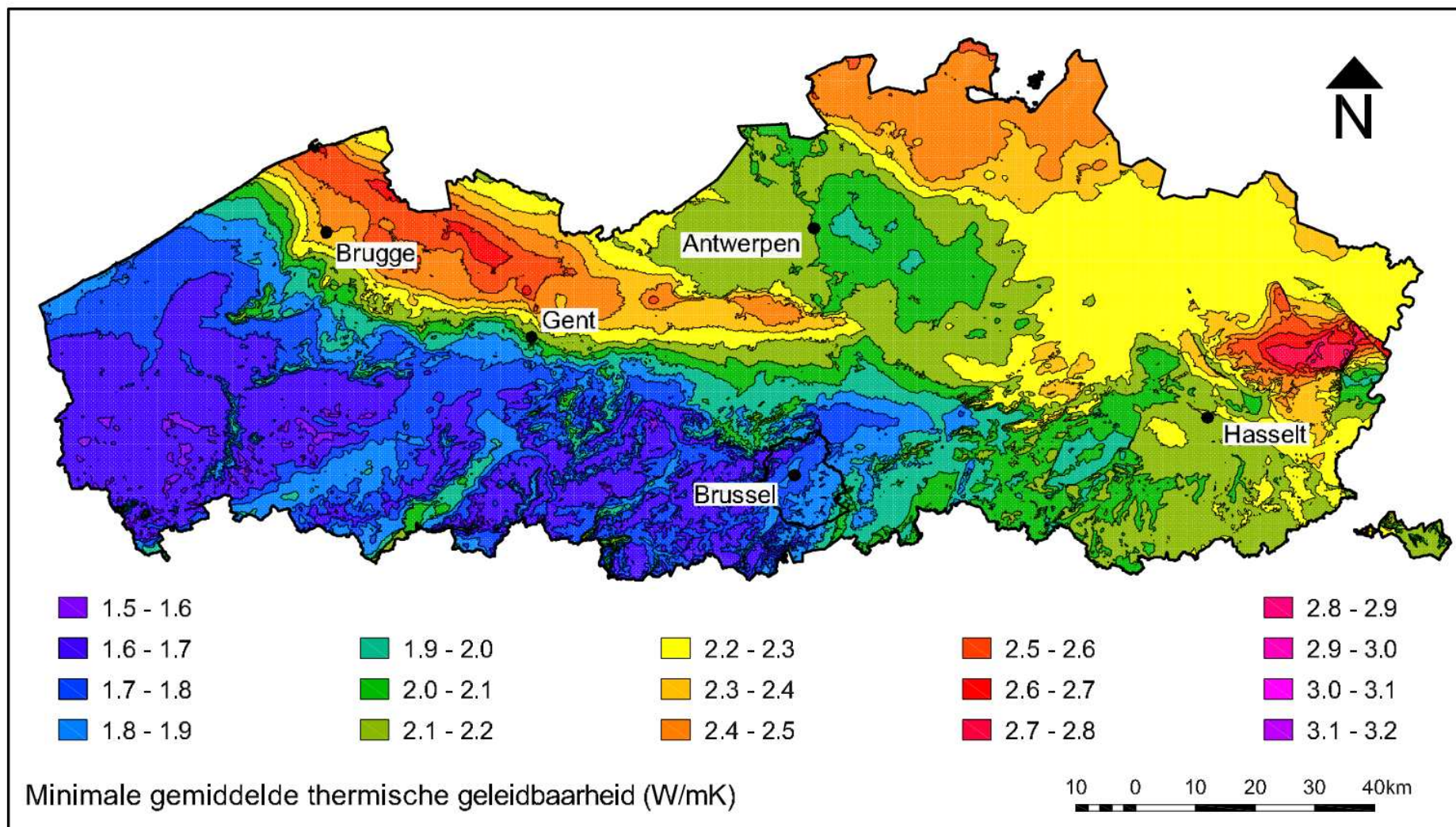
Een verband tussen de korrelgrootte van de stalen en de thermische geleidbaarheid van de bodem is geanalyseerd in de eerste studie naar de thermische geleidbaarheid van de Vlaamse ondergrond in 2002. In deze studie is dergelijke analyse niet verder uitgebreid. In de analyse van de eerste 100 m is eventuele ontbrekende informatie ingevuld door vergelijking van de lithologie met formaties waarvan de geleidbaarheid wel gekend is, dit om de kartering van de geleidbaarheid te kunnen vervolledigen.

Figuur 9 geeft een beeld van de gemiddelde thermische geleidbaarheid in Vlaanderen tot op een diepte van 100 meter of tot op de vaste rots.

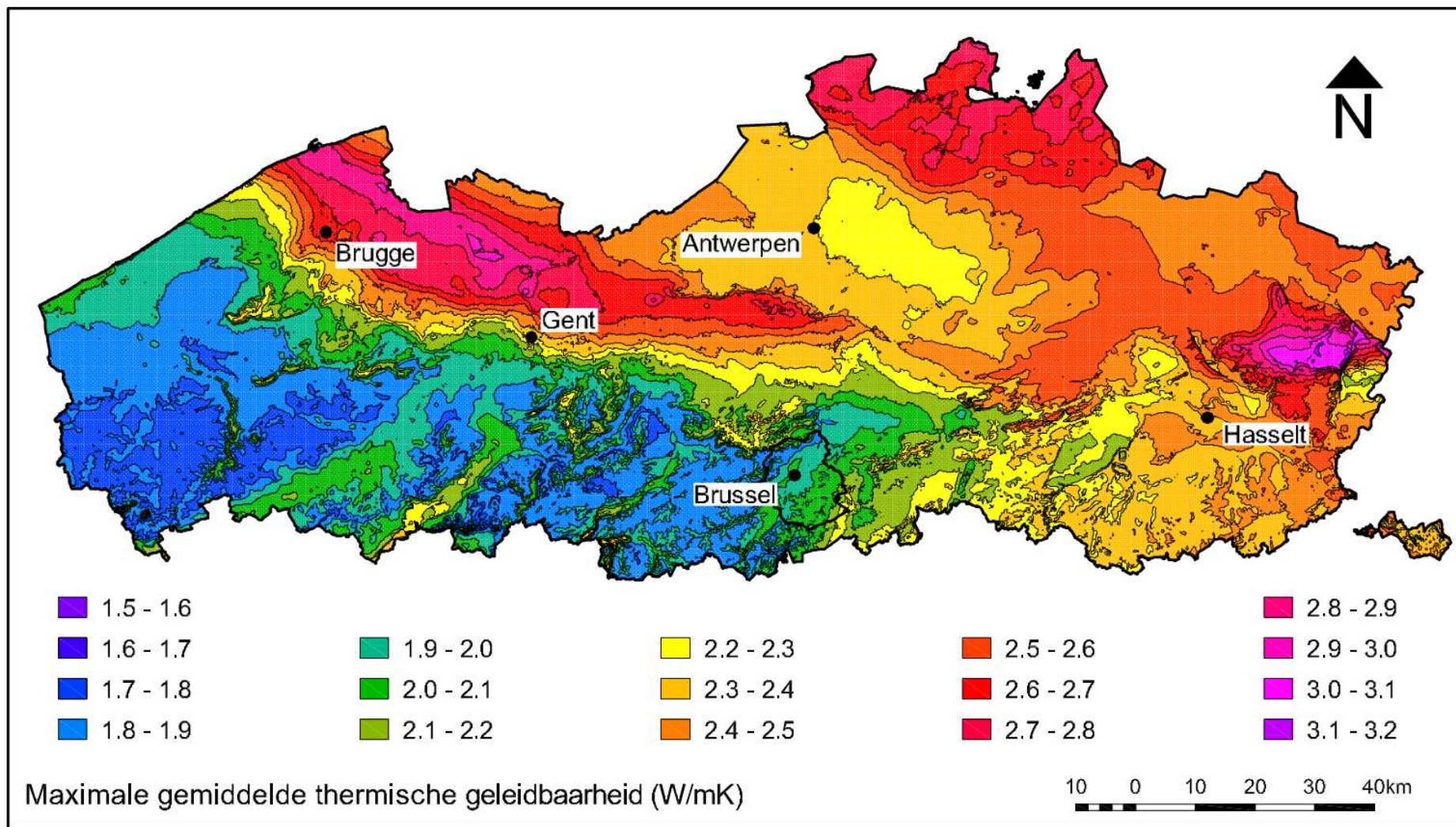
Figuur 10 en Figuur 11 geven een zelfde beeld maar dan gerekend met de respectievelijk minimale en maximale thermische geleidbaarheid per formatie zoals aangegeven in Tabel 23.



Figuur 9: Gemiddelde thermische geleidbaarheid tot op een diepte van 100 m of tot op de vaste rots



Figuur 10: Min gemiddelde thermische geleidbaarheid tot op een diepte van 100 m of tot op de vaste rots



Figuur 11: : Max gemiddelde thermische geleidbaarheid tot op een diepte van 100 m of tot op de vaste rots

5 BESLUIT

Wanneer er bij het ontwerpen van een verticale warmtewisselaar of een BEO-veld enkel gesteund wordt op de waarden uit de literatuur (meestal uit labotesten bekomen), zal er vaak met een zeer algemeen afgeleide en foutieve warmtegeleidbaarheid gerekend worden. Dit zal behoorlijke consequenties hebben voor uitvoering van grotere projecten. Gemeten waarden geven in de meeste gevallen een meer realistisch beeld. Voor bepaalde formaties met verschillende leden is het moeilijk om een éénduidige waarde te bekomen. Bijvoorbeeld de formatie van Bilzen met drie leden, waar het Lid van Berg en het Lid van Kerniel vooral zand bevatten terwijl het Lid van Kleine-Spouwen vooral kleihoudend is. Door de variatie van diktes van de verschillende leden op verschillende lokaties is het bekomen resultaat zeker niet representatief voor de volledige formatie op elke lokatie. Wanneer we echter éénduidige formaties hebben, geven de uit de in-situ testen bekomen waarden wel een realistisch en voor de volledige formatie te gebruiken waarde. Hoewel de resultaten van deze meetcampagne nooit een projectgebonden TRT-meting (voor projecten > 50 kW) kunnen vervangen, bieden deze toch een goed beeld van de verdeling van de geleidbaarheid over de eerste 100 m diepte van de Vlaamse ondergrond.

De resultaten van de uitgevoerde testen maakten het mogelijk om een aantal in de studie van 2002 ontbrekende formaties te analyseren, en de bijhorende overzichtskaart verder te verfijnen. Hierdoor is het mogelijk om bij het ontwerp van een verticale sonde voor energiewinning of een BEO-veld te rekenen met correctere uitgangspunten wat betreft warmtegeleidbaarheid en zo tot performantere energiesystemen te komen. Door een vork op de gemeten waarden te hanteren met grotere of kleinere afwijkingen in functie van de onzekerheid en meetfout, werd de bruikbaarheid van de resultaten van deze meetcampagne voor de praktijk verhoogd. Een voorzichtige inschatting volgens de minimale waardengrafiek zal steeds een veel beter beeld geven van de thermische eigenschappen van de Vlaamse bodem dan de bestaande literatuurwaardes.

REFERENTIES

Bogemans, F. (2005): Quartairgeologische overzichtskaart 1:200.000 - Technisch verslag bij de opmaak van de Quartairgeologische overzichtskaart van Vlaanderen, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie. (<http://dov.vlaanderen.be/>)

GIS-Vlaanderen, (2001): Digitale versie van de Tertiaire geologische kaart, MVG, EWBL, afdeling Natuurlijke Rijkdommen & Energie. (<http://www.gisvlaanderen.be/>)

Gulinck, M., 1973: Note sur l'extension des facies fluvio-lagunaires du Landénien de la Belgique, Toelichtende verhandelingen voor de Geologische kaart en Mijnkaart van België, Verhandeling 13, Ministerie van economische zaken, Bestuur van het Mijnwezen, Aardkundige Dienst van België.

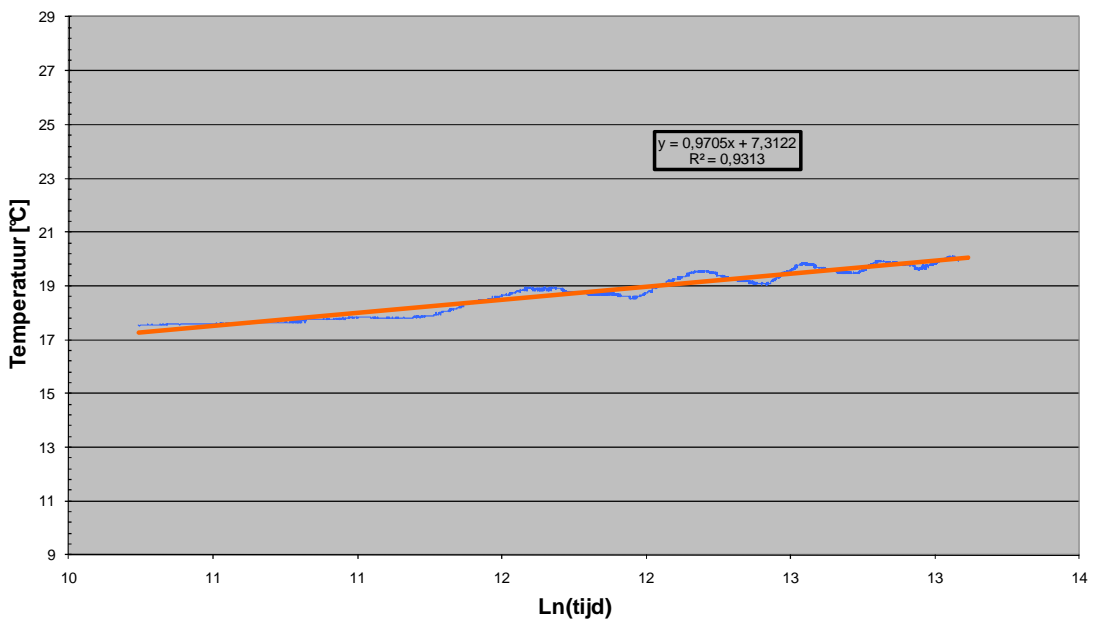
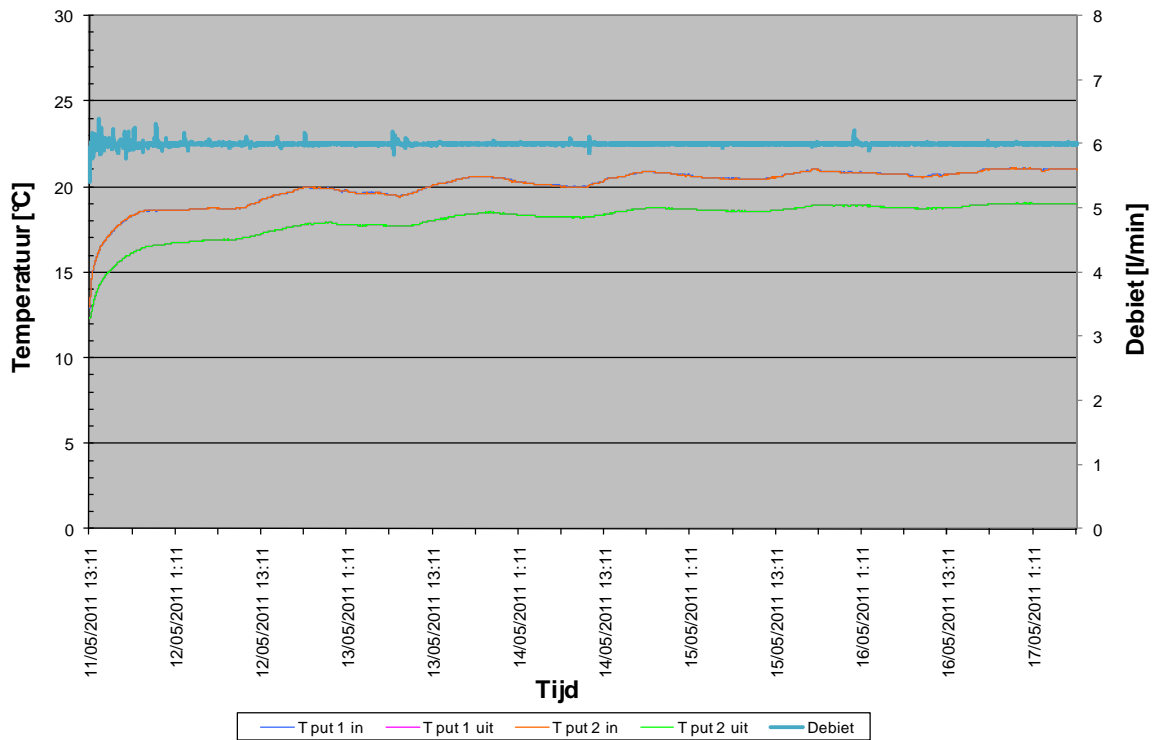
Meyus, Y., De Smet, D., De Smet, F., Walraevens, K., Batelaan, O. & Van Camp, M., 2000: Hydrogeologische codering van de ondergrond van Vlaanderen (HCOV), @wel 8 – water. (<http://homepages.vub.ac.be/~ymeyus/hcov.htm>)

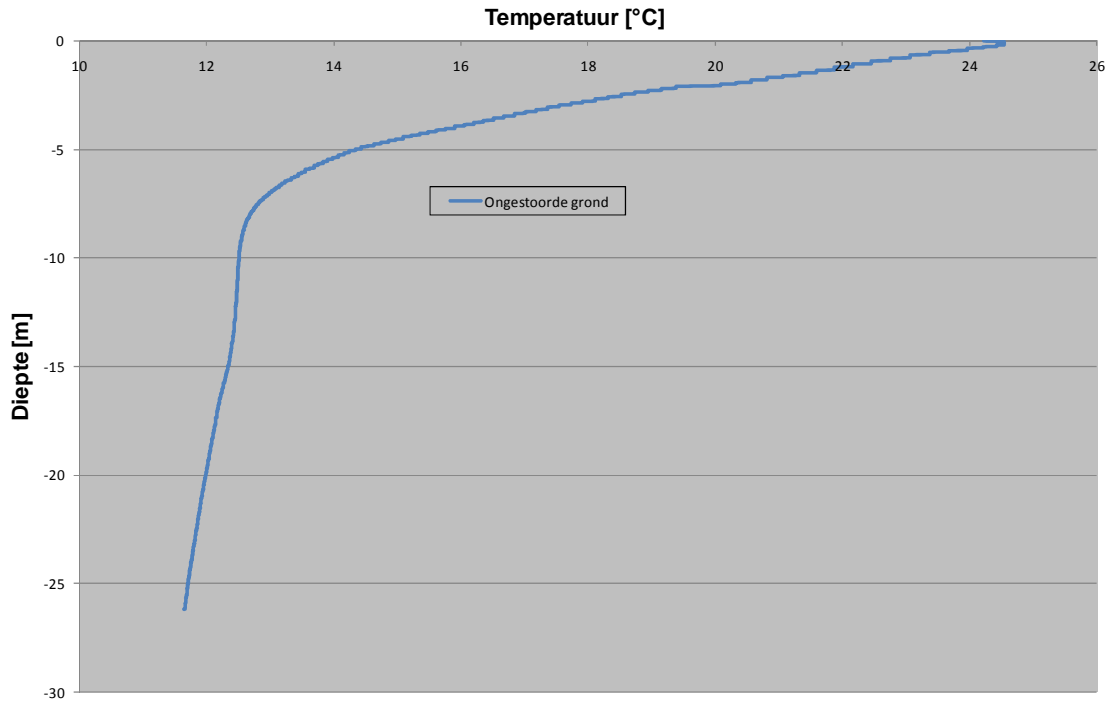
Meyus, Y., Cools, J., Adyns, D., Zeleke, S.Y., Woldeamlak, S.T., Batelaan, O. & De Smet, F., 2005: Vlaams Grondwater Model - Hydrogeologische detailstudie van de ondergrond in Vlaanderen, Eindrapport Vrije Universiteit Brussel, Onderzoeksopdracht voor het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, Administratie Milieu-, Natuur-, Land- en Waterbeheer, afdeling Water.

Van Campenhout, P., De Ceukelaire, M., Duser, M. & Declercq, P.Y., 2007: Aanpassen van de Hydrogeologische Kartering van de Ondergrond in Vlaanderen (HCOV), Eindrapport Belgische Geologische Dienst, Onderzoeksopdracht voor het Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Departement Leefmilieu en Infrastructuur, AMINAL, afdeling Water.

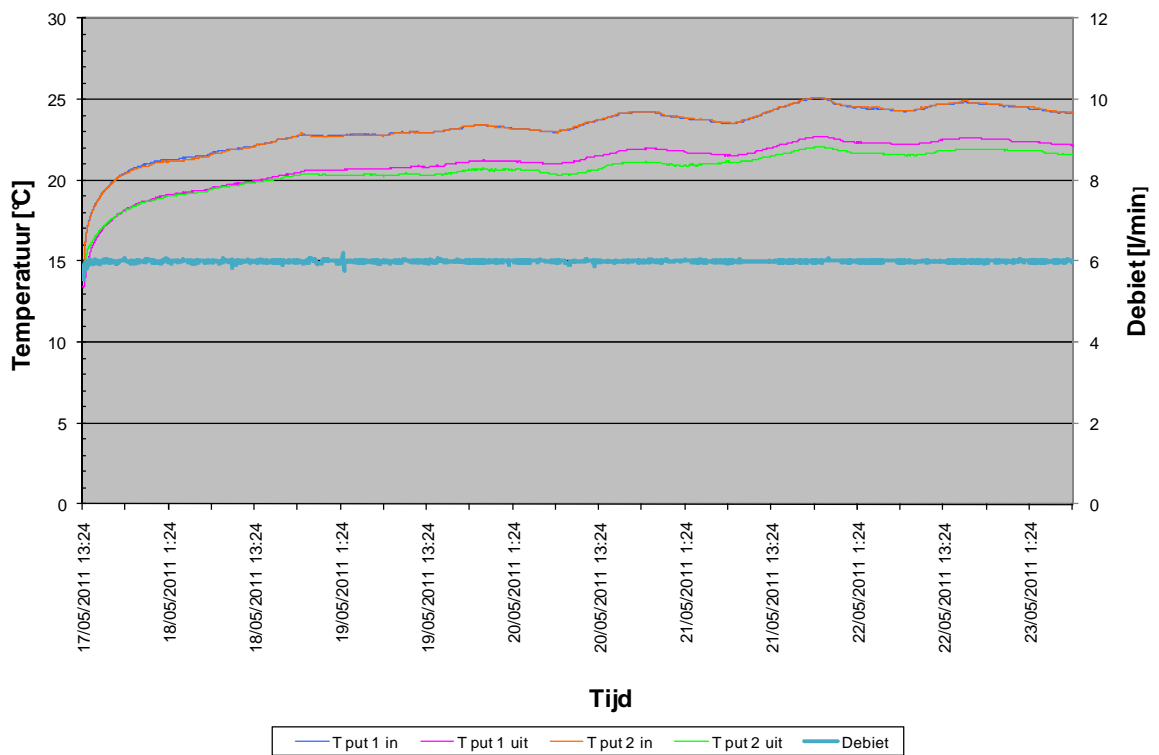
BIJLAGE

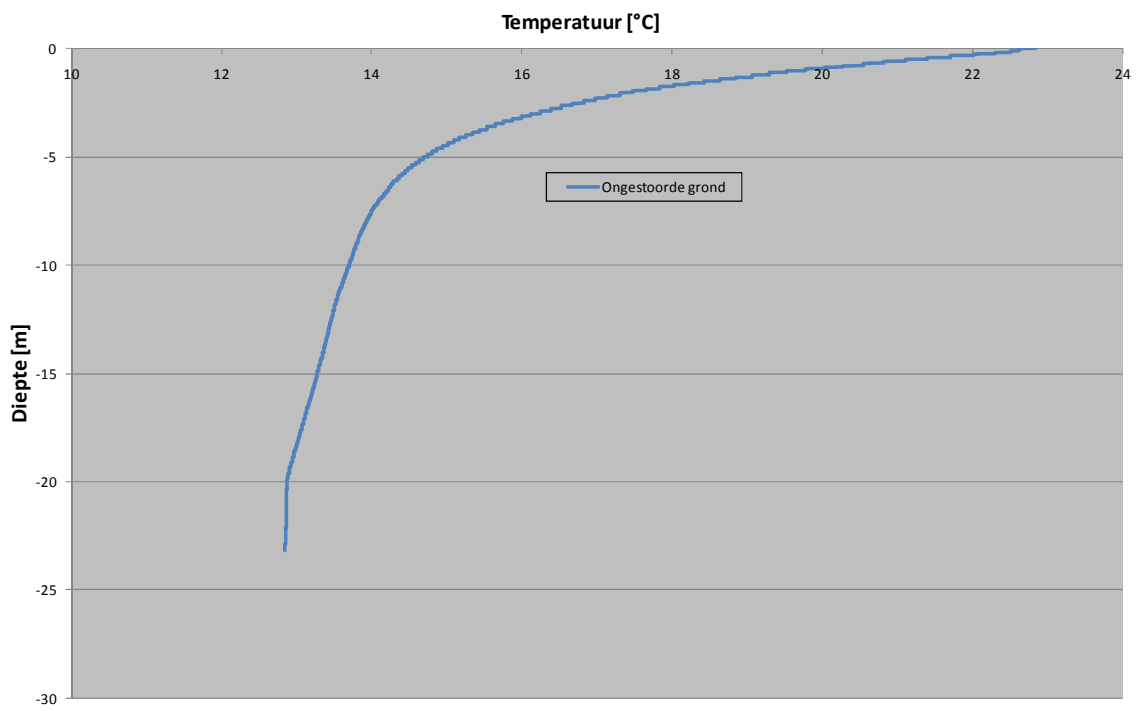
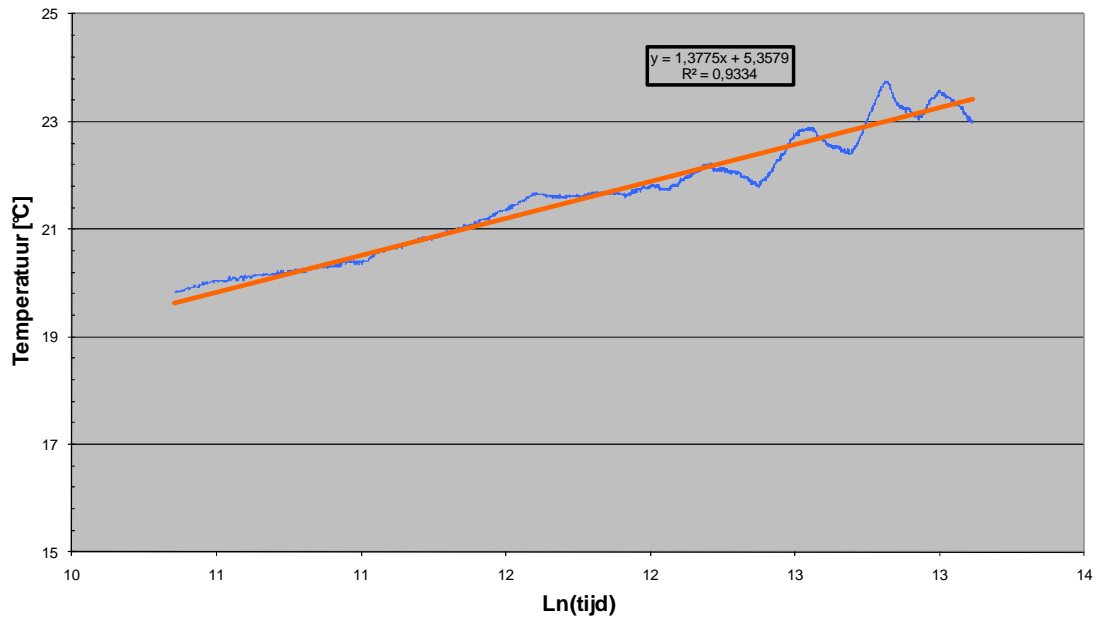
Formatie van Aalter



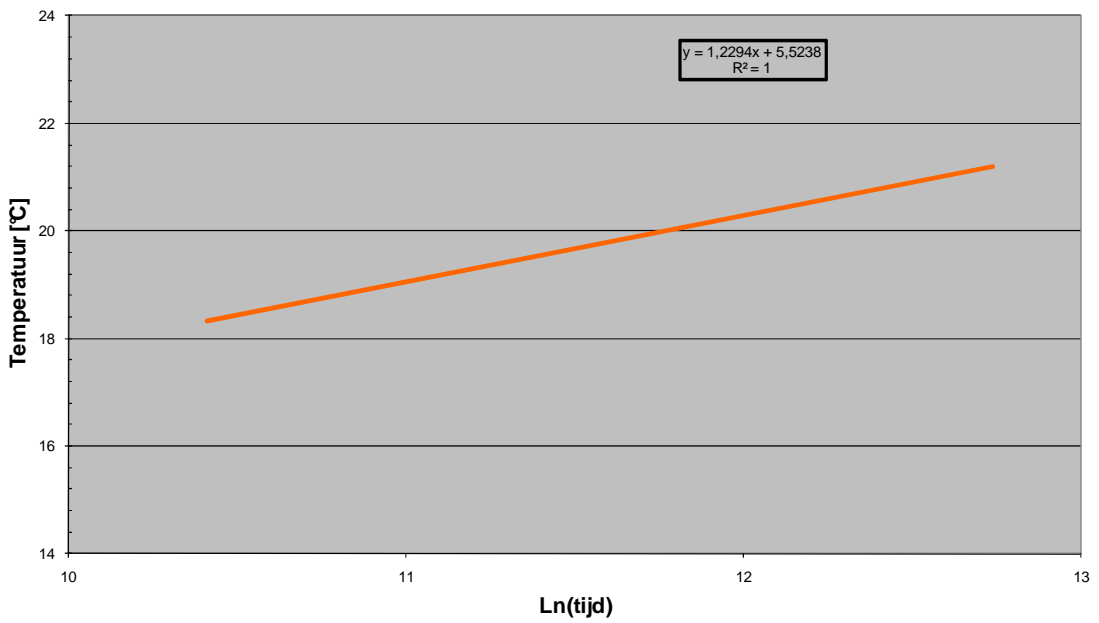
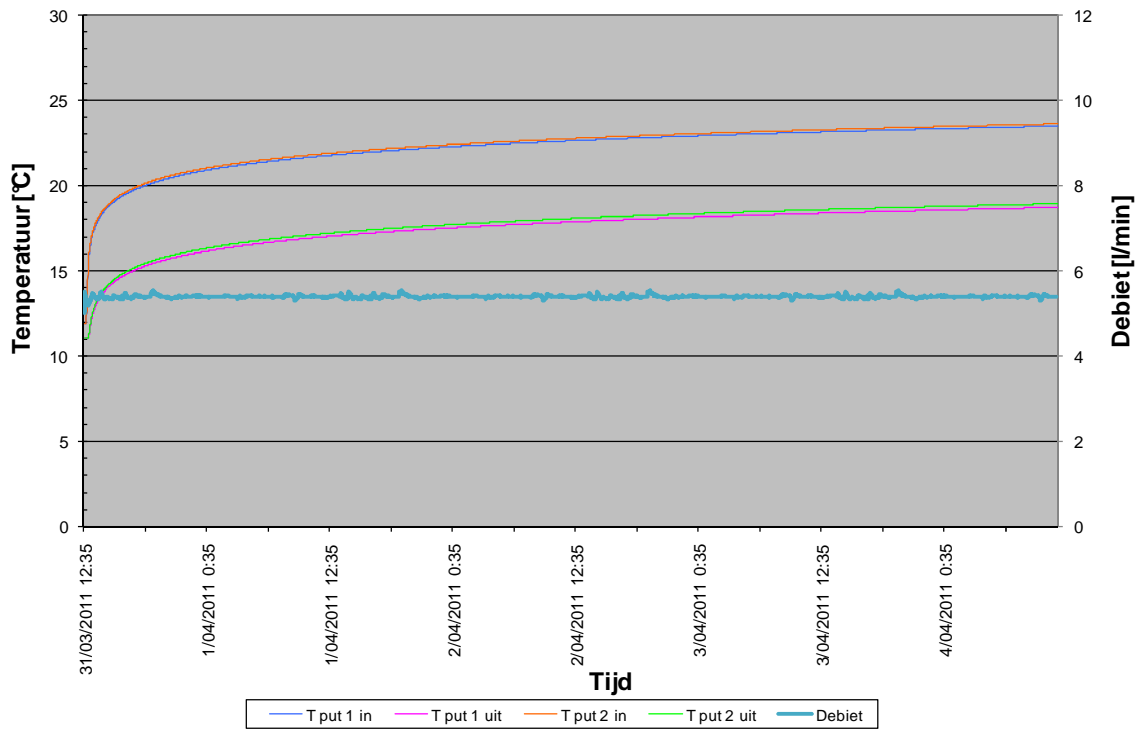


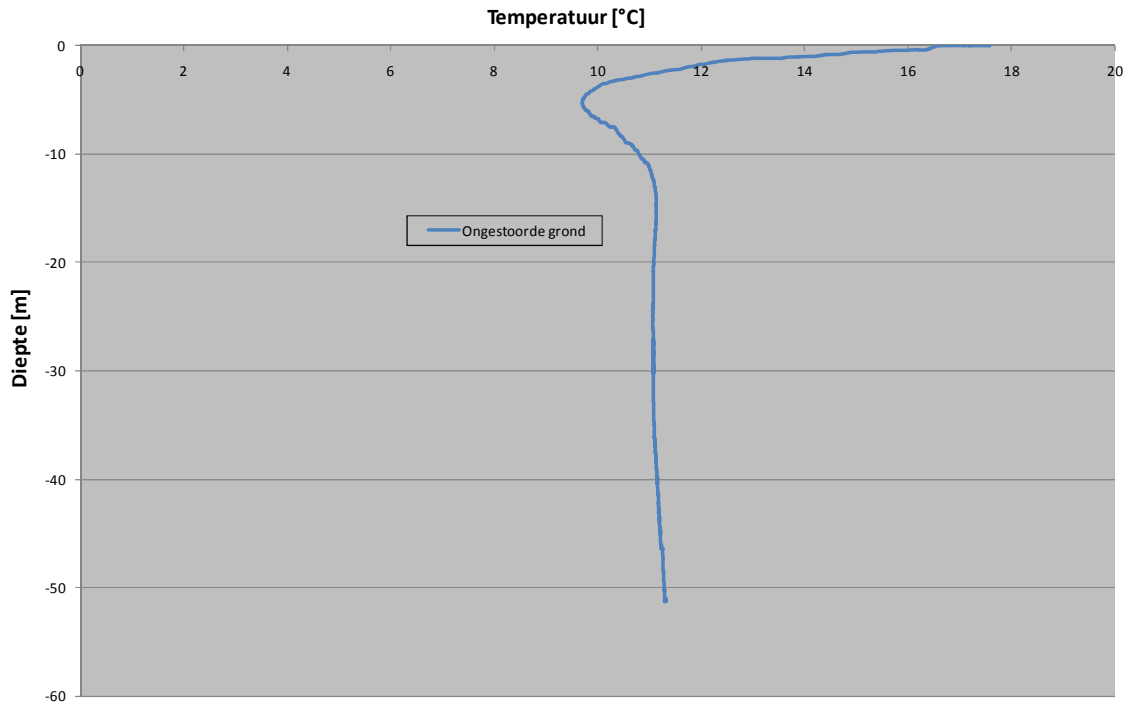
Quartair van de Vlaamse Vallei



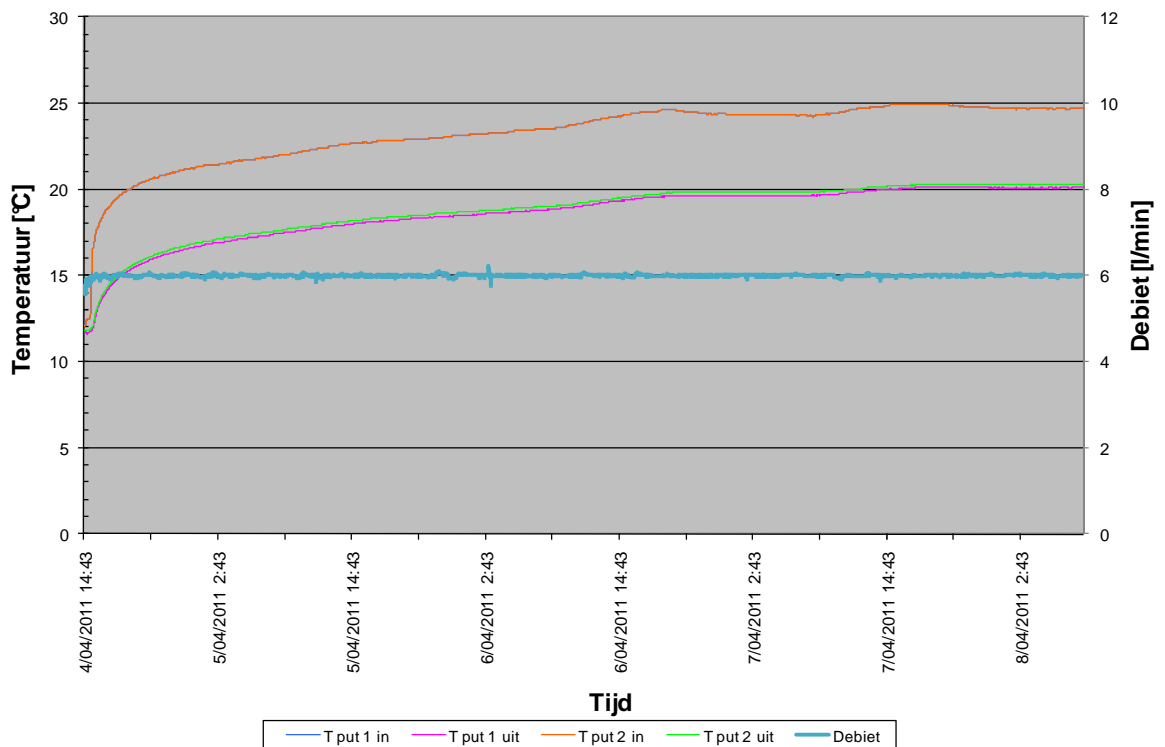


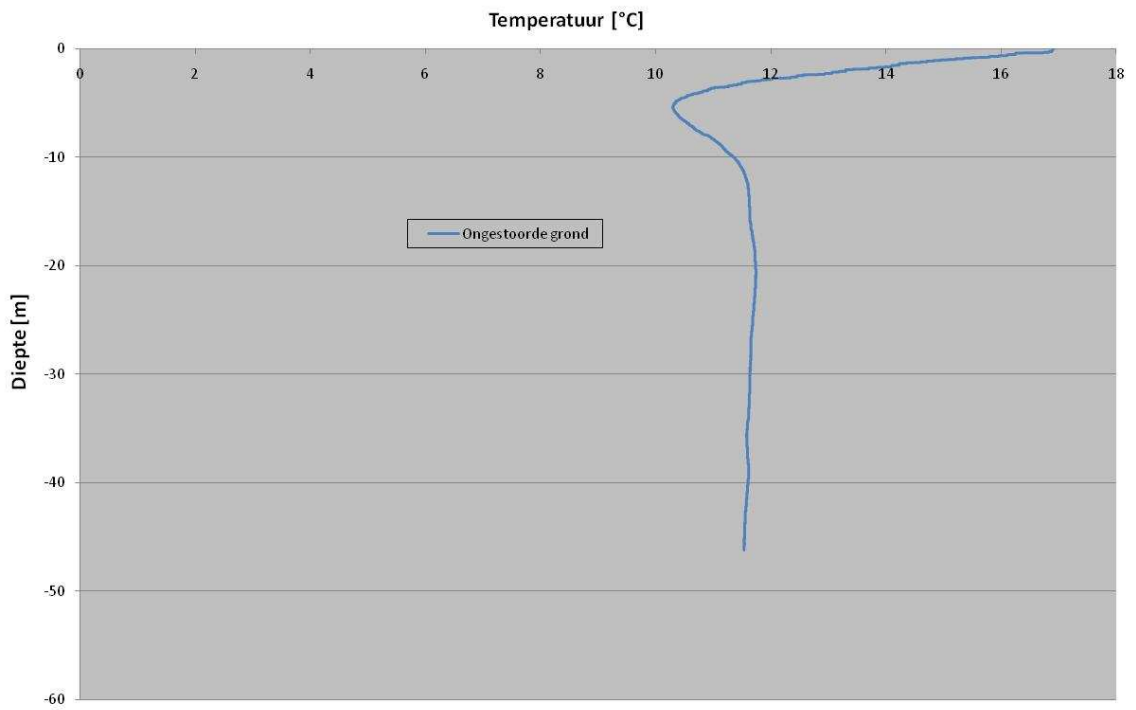
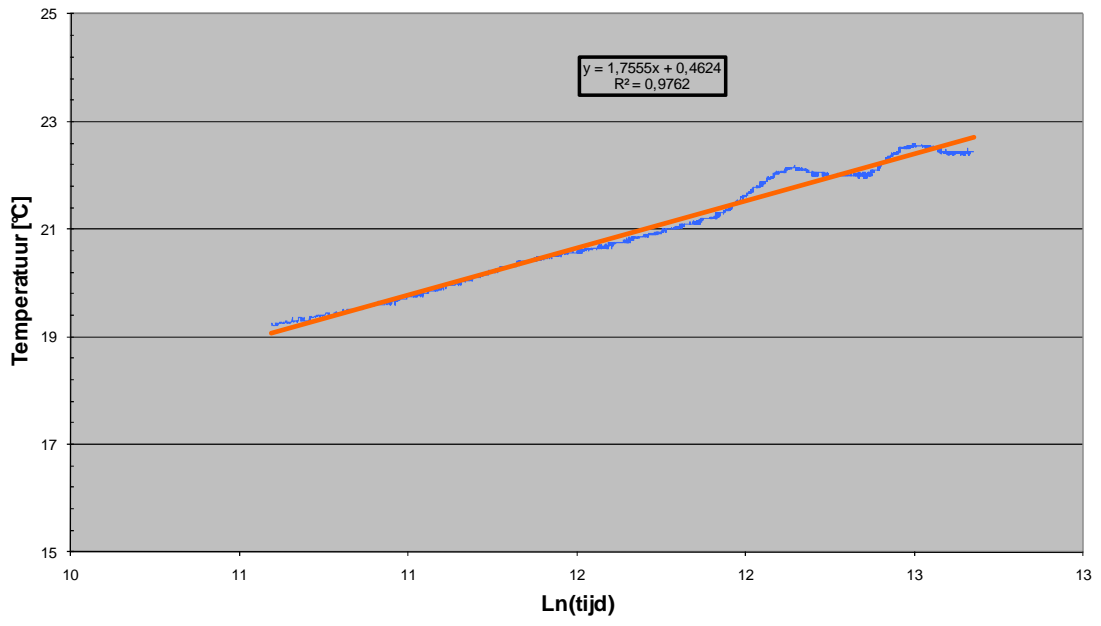
Formatie van Lillo



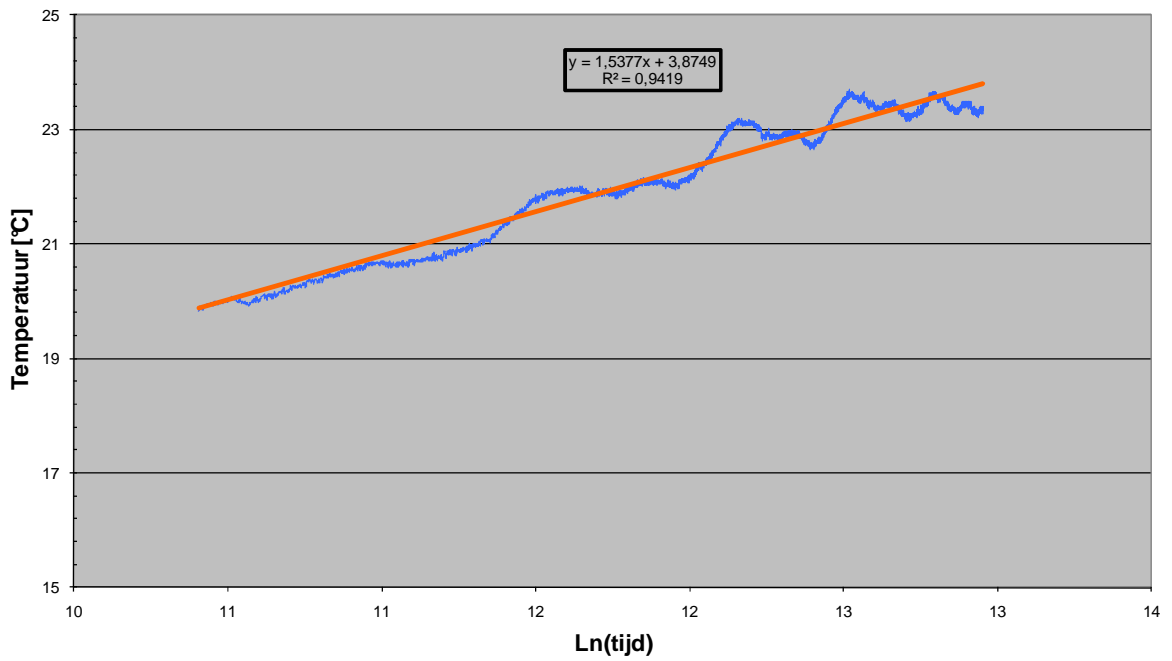
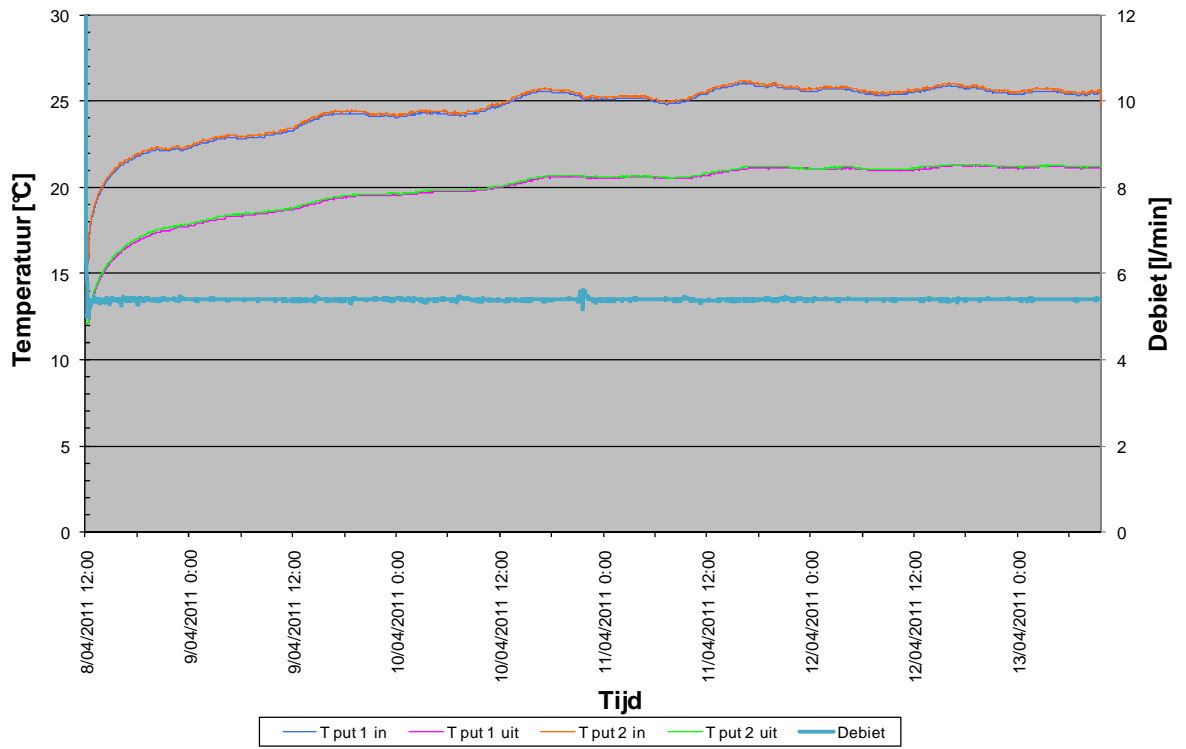


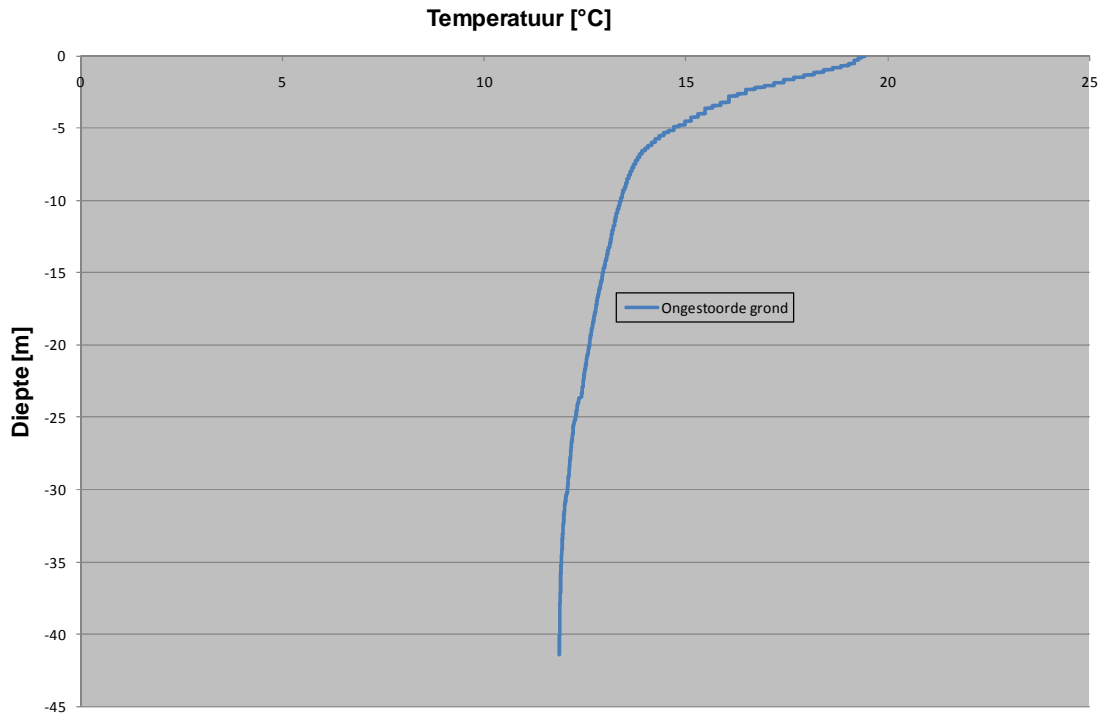
Formatie van Berchem



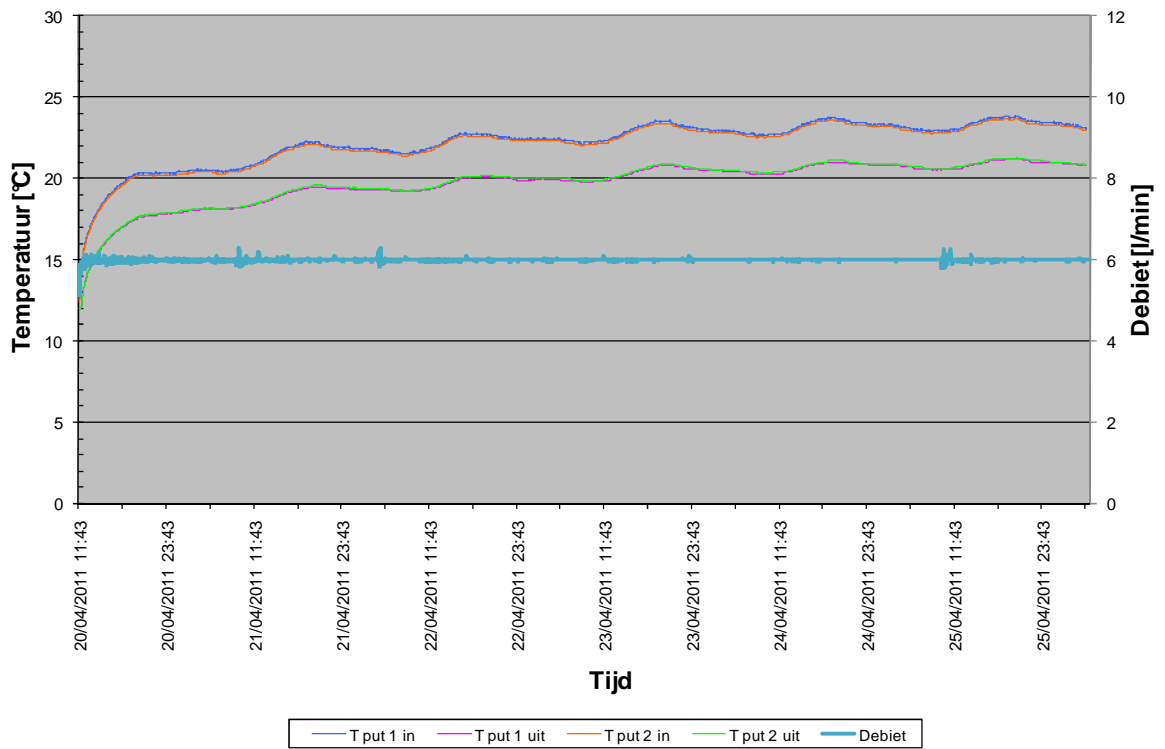


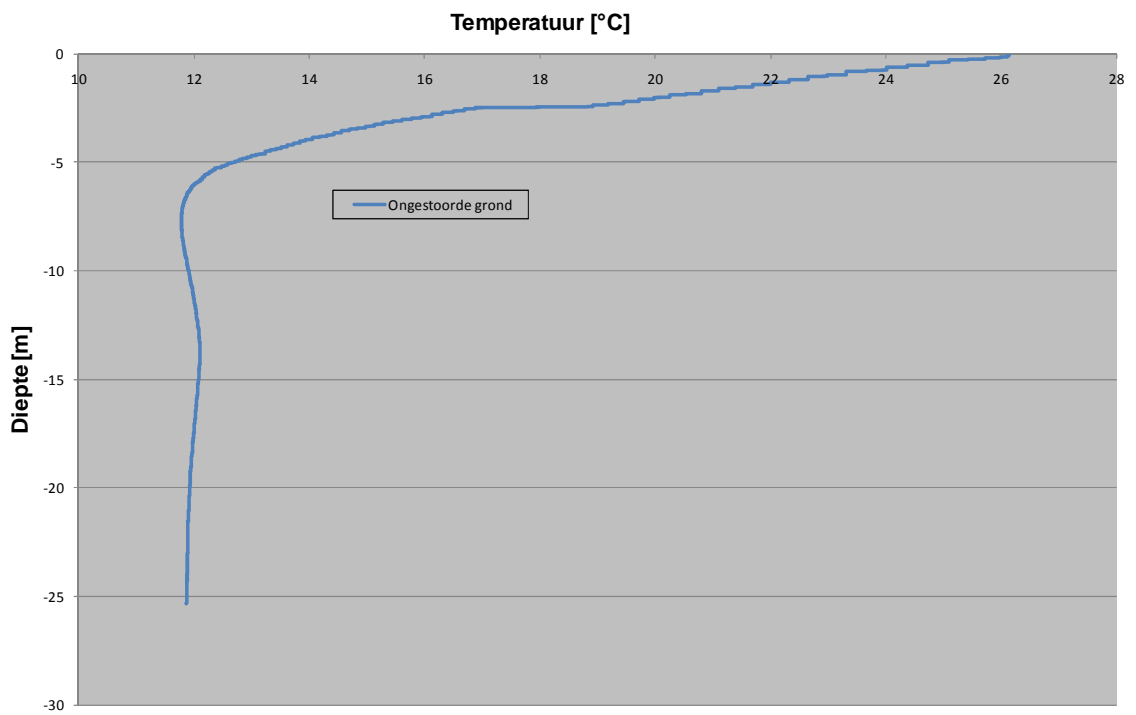
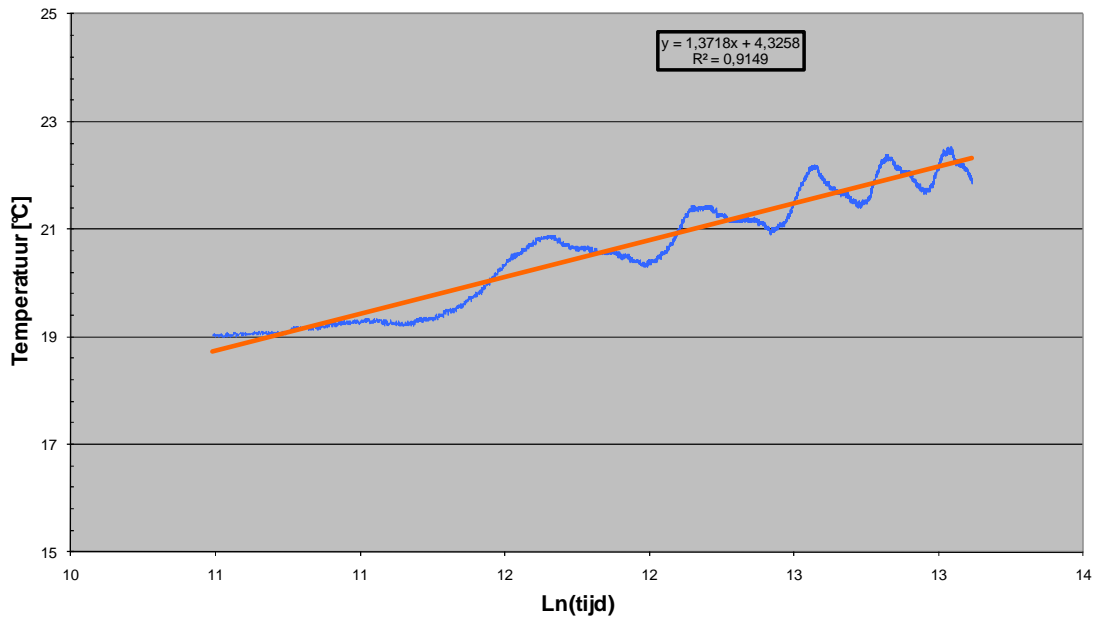
Formatie van Lede



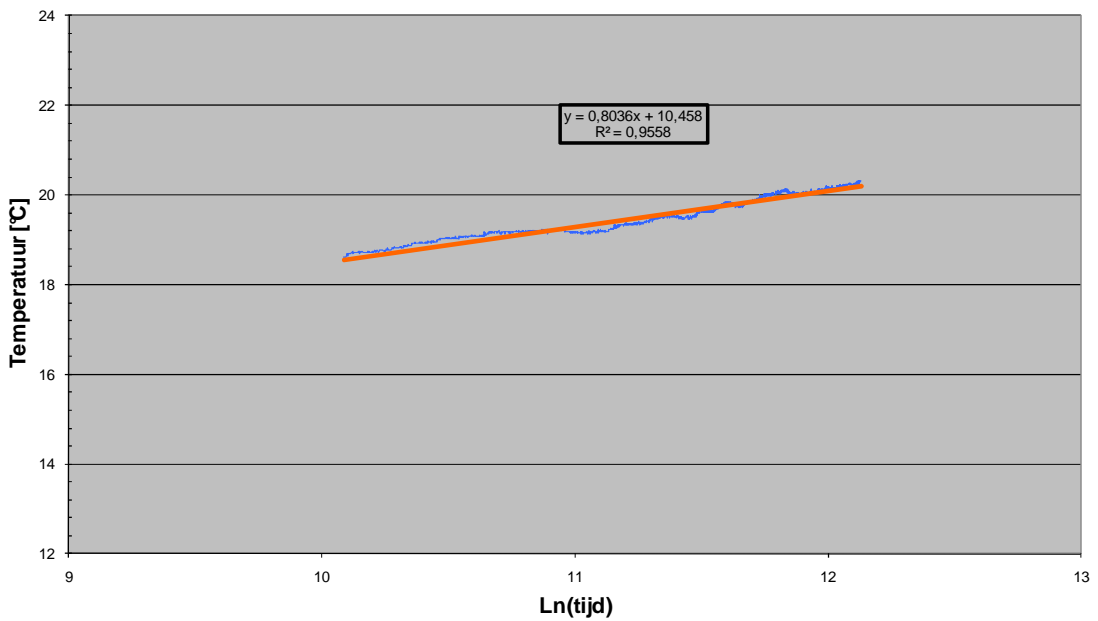
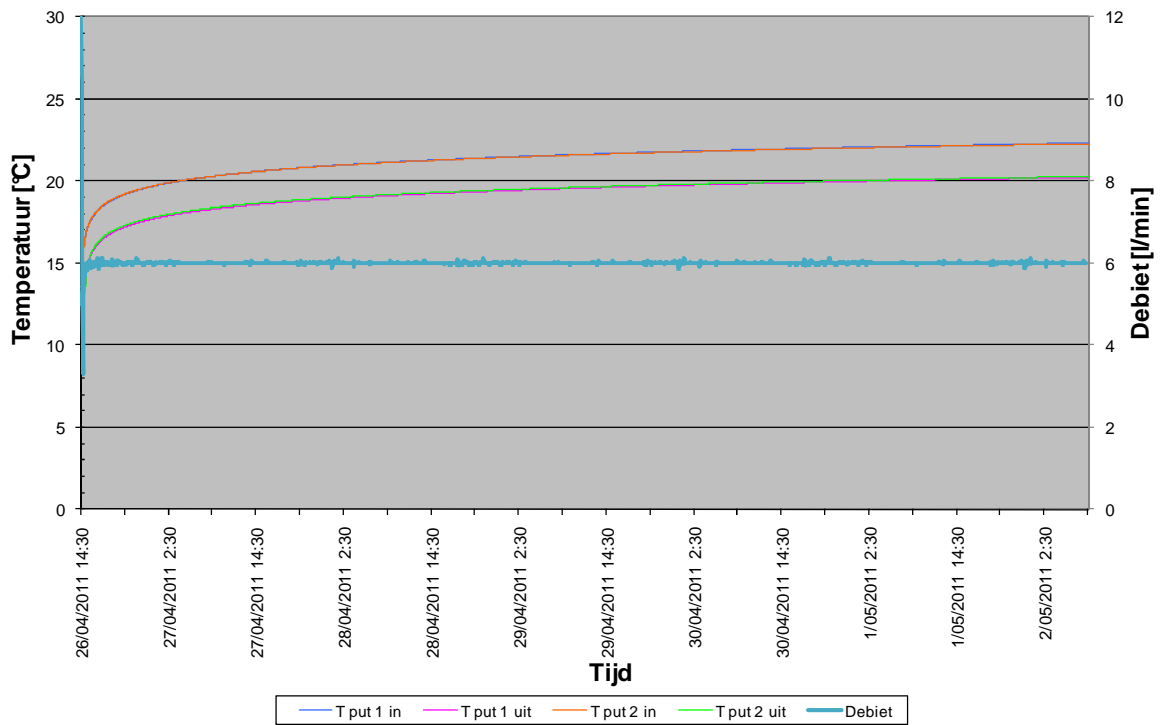


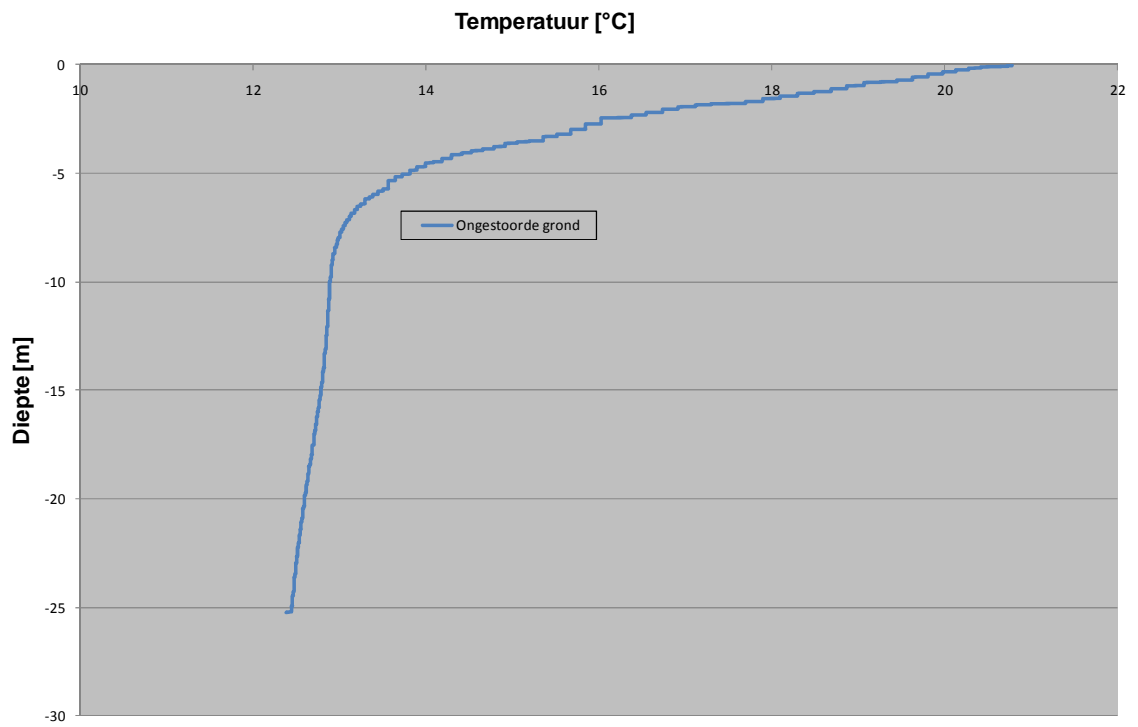
Formatie van Tienen



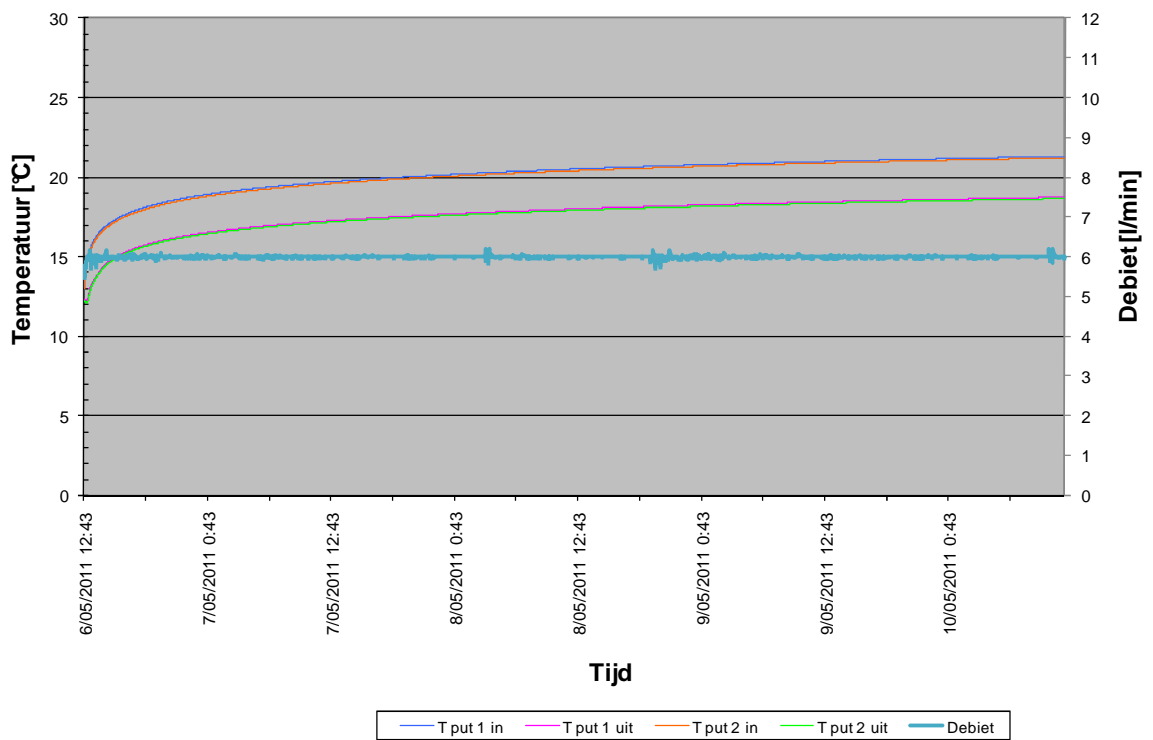


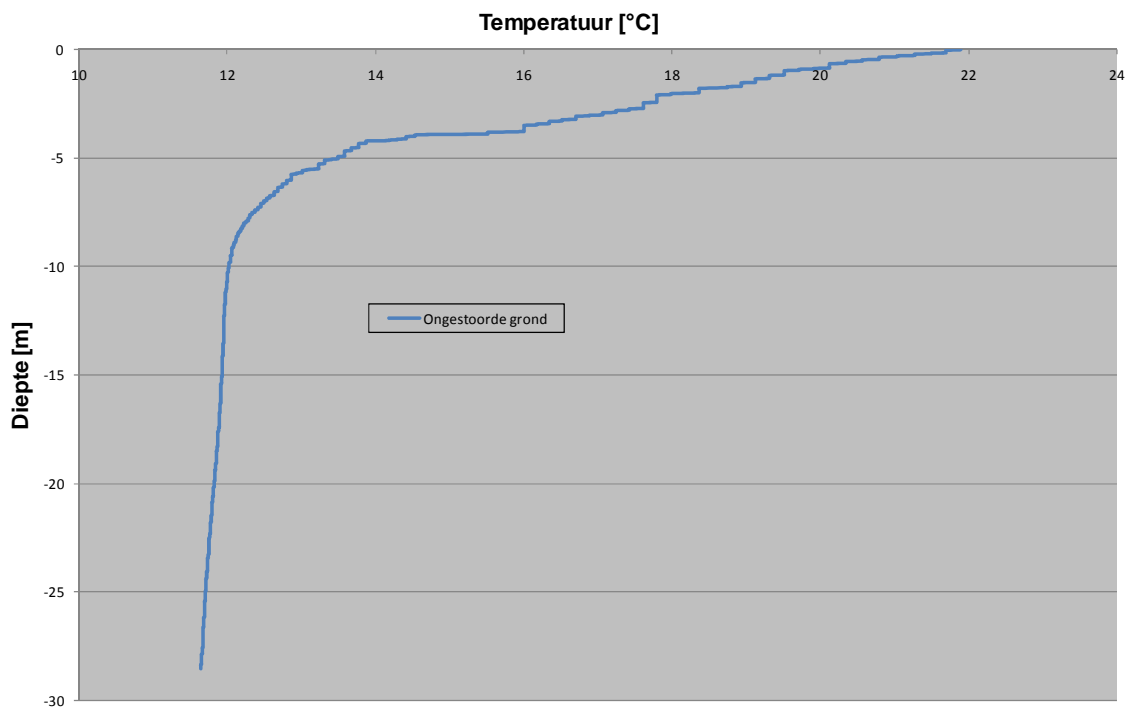
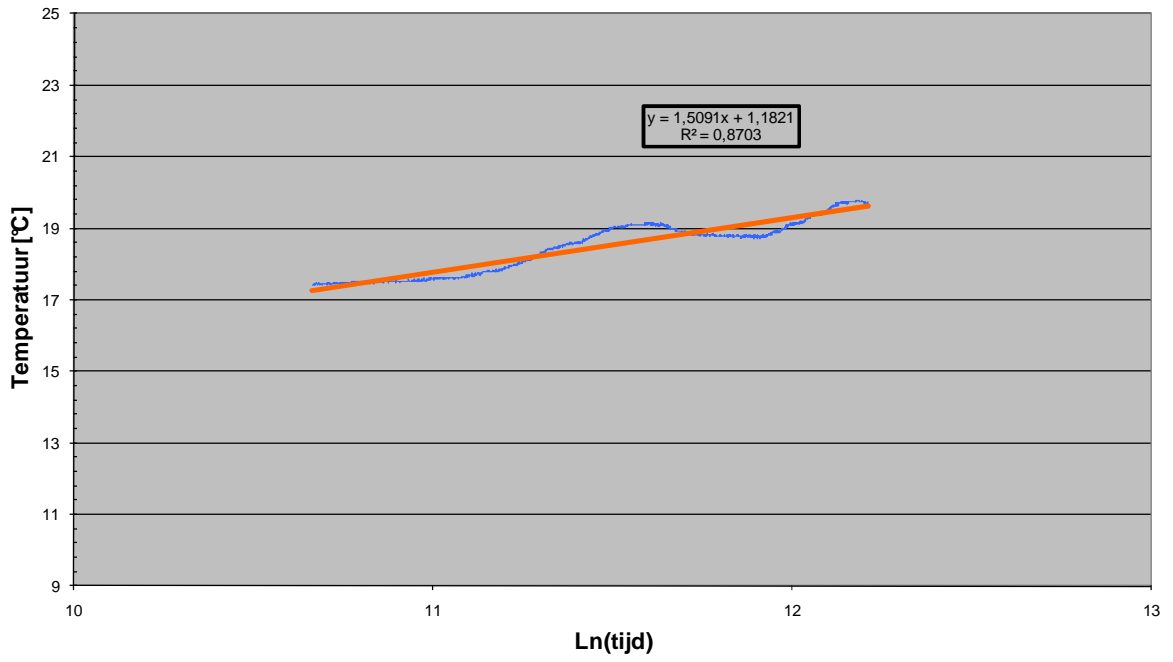
Formatie van Borgloon



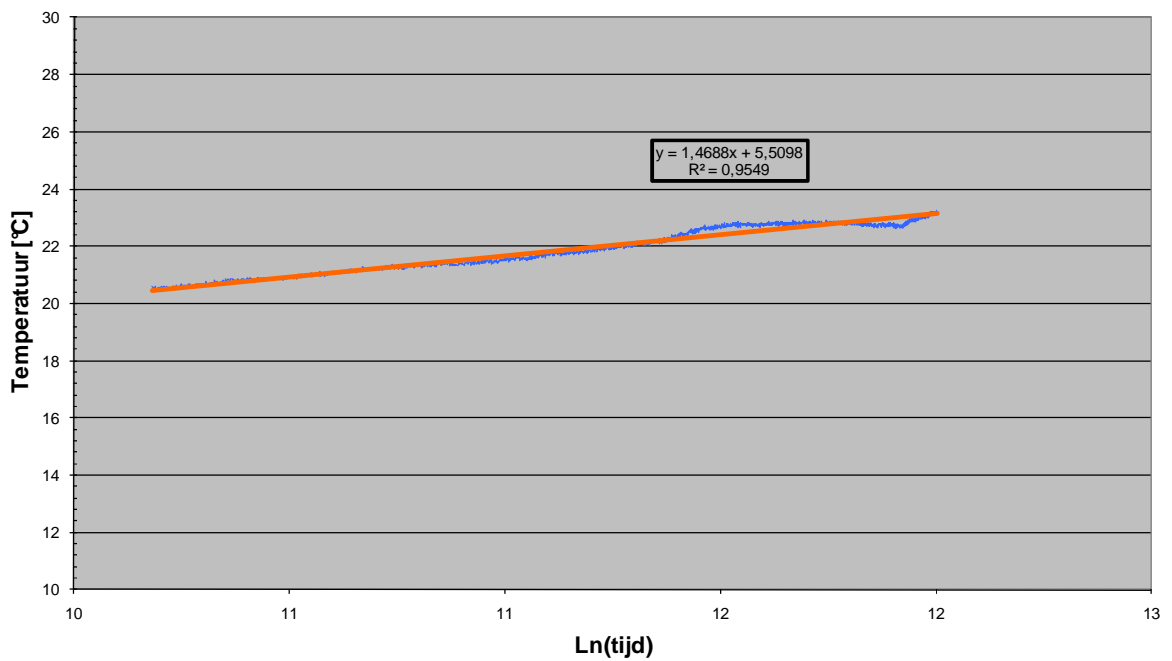
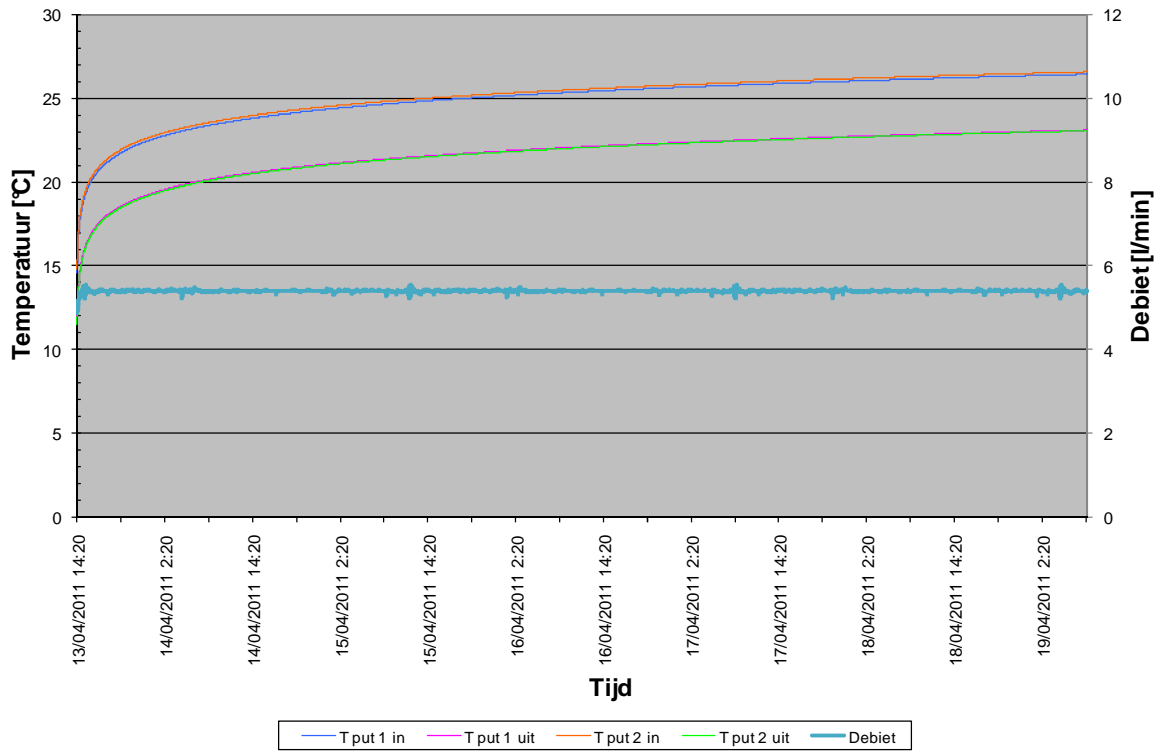


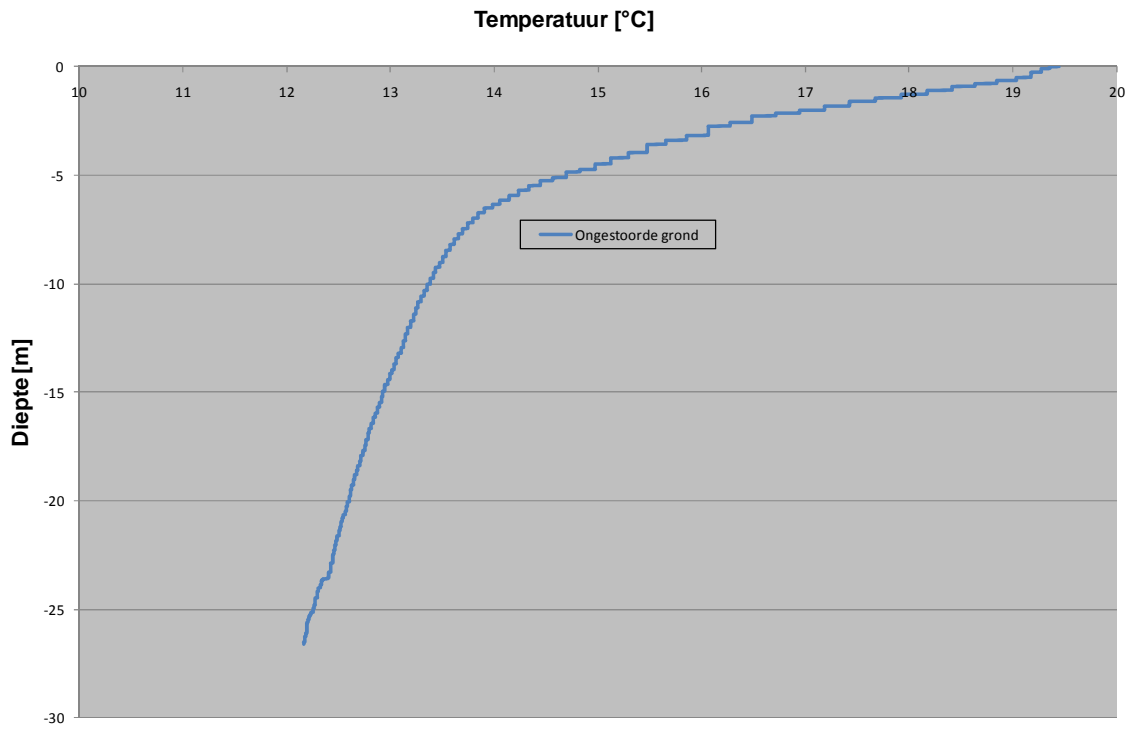
Formatie van Voort-Eigenbilzen





Formatie van Bilzen





Maasgrinden

