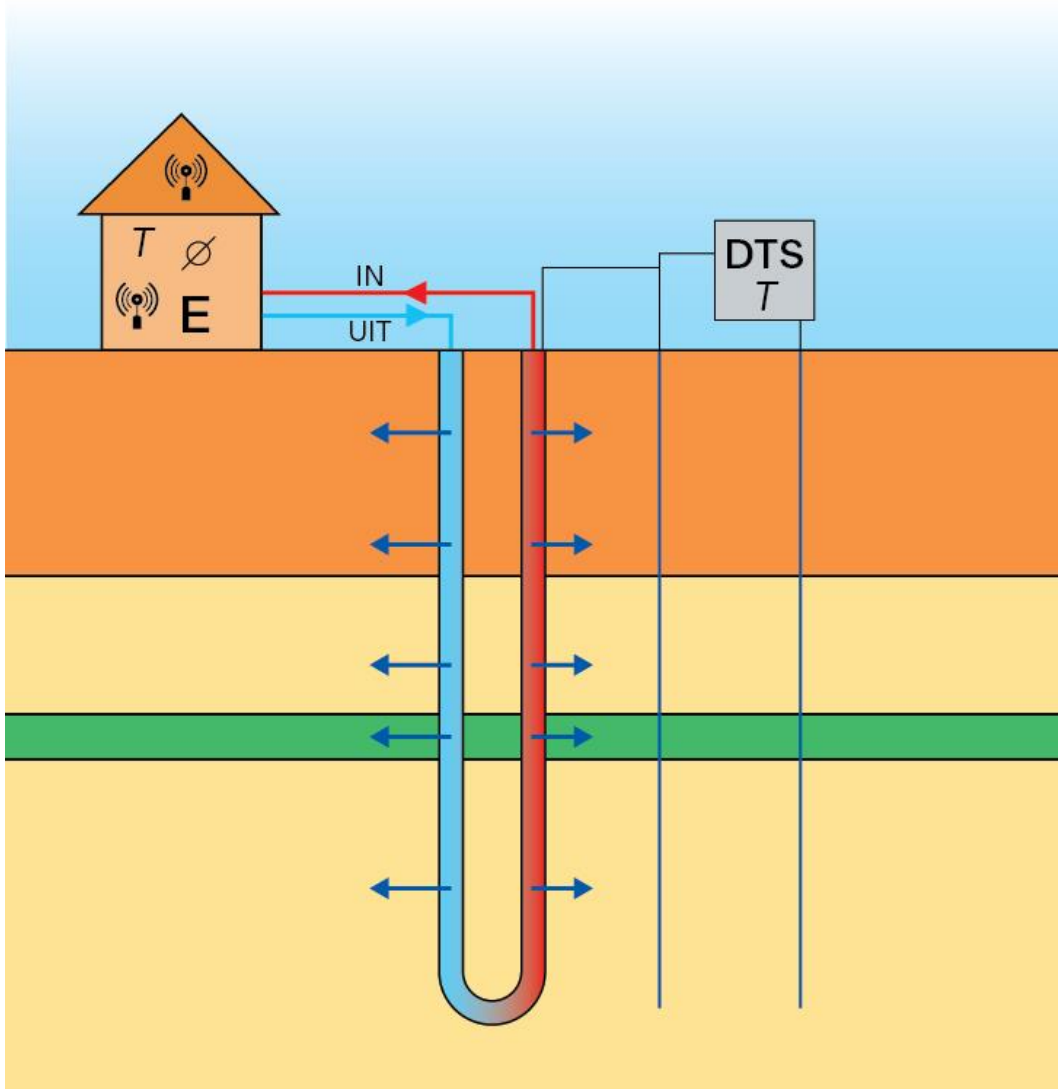


OPTIGBES Optimalisatie van gesloten bodemenergiesystemen

Eindrapport



OPTIGBES Optimalisatie van gesloten bodemenergiesystemen

Eindrapport

Opdrachtgever: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland – Topsector Energie – TKI UE

projectnummer: TEUE219012

Auteur(s)

dr. H. Kooi (Deltares)
dr. H.J.L. Witte (Groenholland Geo-energiesystemen B.V.)
MSc D. Bakker (Groenholland Geo-energiesystemen B.V.)
drs. P. Doornenbal (Deltares)
MSc M. Pefkos (Deltares)
MSc S. Beernink (KWR)
dr. N. Hartog (KWR)

Kwaliteitsborging

dr. P. Pauw (Deltares)

Met medewerking van

Annelies de Graaf (SIKB)
Theo Bauerhuit (Nathan)
Hester Koot (Nathan)
Ir. Eric Broers (KWR)

Deltares

G E O E N E R G Y S Y S T E M S
GROENHOLLAND

NATHAN
driven by knowledge



KWR

**BRANCHEVERENIGING
bodemenergie**



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Samenvatting

Dit rapport doet verslag van het TKI Urban Energy onderzoeksproject OPTIGBES, 'Optimalisatie inzet gesloten bodemenergiesystemen in de energietransitie; de effecten op de ondergrondtemperatuur in beeld met fibre-optic temperatuurmonitoring'. OPTIGBES is uitgevoerd in de periode 1 februari 2020 - 1 juli 2024.

Achtergrond

Een gesloten bodemenergiesysteem (GBES¹) wordt ingezet als bron van warmte en koude voor verwarming en koeling van woningen en kleine utiliteit. Een GBES is opgebouwd uit een of meerdere bodemwarmtewisselaars (BWW's). De meeste BWW's bestaan uit een polyethyleen leiding die in een U-vorm in een boorgat wordt aangebracht (meestal een enkele U-lus, soms een dubbele U-lus of concentrische configuratie). Het boorgat waarin de BWW is ingebouwd wordt volledig aangevuld. Door de BWW stroomt een vloeistof (water of water-antivriesmengsel) die via temperatuurverschil warmte uit de bodem onttrekt (verwarmingsbedrijf), of eraan afstaat (koelbedrijf). De bodem rond de BWW koelt af (verwarmingsbedrijf) of warmt op (koelbedrijf). Ontwerp van een GBES omvat de bepaling van de noodzakelijke omvang (aantal, diepte) van de BWW's als functie van energiebehoefte, gewenst rendement en bodemeigenschappen waarbij de energiebehoefte voor tenminste 50 jaar gegarandeerd moet zijn. Bij het ontwerp moet rekening gehouden worden met thermische interacties (interferentie) tussen individuele BWW's van het systeem en met eventueel andere GBES in de omgeving. Ontwerp en realisatie van GBES is in Nederland geregeld in diverse richtlijnen (BRL-en) en protocollen (SIKB BRL en protocol 11000 / 11001, BRL 6000-21).

In Nederland zijn er circa 100.000 GBES, worden momenteel 15.000 tot 20.000 systemen per jaar aangelegd, en kan het groeitempo in de energietransitie toenemen tot 30.000 – 50.000 per jaar. Met deze grote toename is het van belang om de ondergrondse ruimte optimaal en doelmatig te benutten voor de inzet van deze techniek en richtlijnen en protocollen waar mogelijk hierop aan te scherpen.

Doel

Het doel van OPTIGBES is om met gedetailleerde temperatuurmetingen (hoge resolutie in ruimte en tijd) in kaart te brengen wat er op een locatie met meerdere bodemlussen gebeurt, en op basis daarvan:

1. Ontwerpmethoden en standaard rekenmodellen² toegepast voor ontwerp van gesloten bodemenergiesystemen te toetsen.
2. Rekenmethoden² voor bepalen mogelijke negatieve interferentie te toetsen.
3. Effecten van afwijkingen in belangrijke ontwerp-randvoorwaarden (energievraagpatroon, thermische bodemeigenschappen) te bepalen.
4. Met stakeholders te verkennen of en op welke wijze de bevindingen aanleiding bieden voor mogelijke aanpassingen aan beoordelingsrichtlijnen (BRL) en protocollen voor ontwerp en realisatie gesloten bodemenergiesystemen.

¹ GBES wordt tevens gebruikt voor de meervoudsvorm 'gesloten bodemenergiesystemen'

² Deze rekenmodellen zijn gebaseerd op warmtegeleiding en daarmee op situaties waarin grondwaterstromingsinvloeden afwezig/verwaarloosbaar zijn.

Activiteiten

De aanpak bestond uit de volgende stappen:

- *Inrichten monitoringslocatie.* Er is een monitoringslocatie gerealiseerd op het terrein van de nieuwbouw van een appartementencomplex aan de Atlantakade in het centrum van Hoogezand (Groningen) met 46 appartementen. Elk van de woningen is voor warmte- en koudelevering voorzien van een warmtepomp gekoppeld aan een individuele bodemwarmtewisselaar tot ca 130 m diepte. Glasvezelkabel voor DTS (distributed temperature sensing) is bevestigd aan de bodemlussen behorende bij drie appartementen tijdens de installatie van de wisselaars, én in negen boringen rondom/tussen deze wisselaars. Gebouwzijdig zijn instrumenten geplaatst waarmee de energievraag gebouwszijdig (warmte, koude en tapwater), energie-uitwisseling bodemzijdig, en de opgenomen elektrische energie van de appartementen wordt gemeten.
- *Karakterisatie monitoringslocatie.* De ondergrond van de projectlocatie is gekarakteriseerd door middel van boorgatmetingen, deviatieingen³, en Thermische Respons Testen (TRT's).
- *Monitoring.* Er is gedurende ruim 2,5 jaar monitoringsdata verzameld met de instrumentatie van de monitoringslocatie. Bodemzijdig betreft dit temperatuurwaarden voor elke 25 cm lengte van de glasvezelkabel in de 13 boorgaten met een tijdsinterval van enkele minuten.

Analyse. Met de verkregen monitoringsdata zijn analyses uitgevoerd gericht op de projectdoelen 1 t/m 3. De toetsing en effectbepaling was daarin gericht op algemene aspecten van GBES ontwerp, niet op de beoordeling van het specifieke ontwerp van de gekozen monitoringlocatie. Desalniettemin is in de analyse op diverse punten wel een vergelijking met het oorspronkelijke ontwerp gemaakt. Allereerst is bekeken hoe de verkregen data zich verhouden tot uitgangspunten voor ontwerp, zoals het energievraagpatroon, rendement, en de thermische bodemeigenschappen. Dit leverde een aantal waardevolle inzichten op waarvan de consequenties voor ontwerp in beeld zijn gebracht met een gevoeligheidsanalyse. Daarnaast is middels modellering onderzocht of de standaardrekenmethoden een adequate prognose geven van de gemeten vloeistoftemperatuurrepons bij de warmtepomp gedurende een warmte- en koudevraag en tijdens (ontwerp)pieklust. In de modellering is zowel gebruik gemaakt van ontwerpsoftwarepakket Earth Energy Designer (EED) als FEFLOW, waarmee de temperatuurontwikkeling in en rond bodemlussen meer in detail kunnen worden gemodelleerd. Vervolgens is de gemeten temperatuurontwikkeling in negen boringen rondom en tussen de BWW's gemodelleerd om de rekenmethoden voor bepaling van negatieve interferentie te toetsen. Daarbij zijn FEFLOW en ITGBES-PRO gebruikt.

- *Workshop.* Er is een workshop gehouden met stakeholders waarin verkend is óf en op welke wijze de bevindingen aanleiding bieden voor mogelijke aanpassingen aan beoordelingsrichtlijnen (BRL) en protocollen voor ontwerp van GBES en voor interferentieberekeningen (doel 4).

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de deliverables van het project en toont waar deze in het rapport zijn ondergebracht.

³ De ruimtelijke afwijking van het boorgat ten opzichte van de richting van de zwaartekracht.

Overzicht van producten (deliverables)

Product	type	Deliverable
Realisatie van een meetsite voor het monitoren van een gesloten bodemenergiesysteem; mijlpaal 1 van onderzoeksproject OPTIGBES	Deelrapport met zes bijlagen (A t/m F)	D1.1
Beschrijving (online) monitoringsdata	Hoofdstuk 4 (dit rapport)	D3.1
Toetsing ontwerpmethoden Gevoeligheid ontwerpmethode voor variaties in uitgangspunten	Hoofdstuk 5 (dit rapport) Hoofdstuk 7 (dit rapport)	D4.1a D4.1b
Toetsing rekenmethoden interferentie	Hoofdstuk 6 (dit rapport)	D5.1a
Verslag stakeholderoverleg implicaties OPTIGBES voor richtlijnen en protocollen	Bijlage M (dit rapport)	D4.2 en D5.2
Overzicht van disseminatieactiviteiten	Bijlage N (dit rapport)	D6.1

Conclusies

De hoofdconclusies zijn de volgende:

1. Ontwerpmethoden en standaard rekenmodellen zoals Earth Energy Designer (EED) en ITGBES-PRO die gebaseerd zijn op warmtetransport door geleiding voldoen – er zijn geen aanwijzingen gevonden dat de methodes en principes onjuist zijn. Wel is vastgesteld dat uitgangspunten voor ontwerpberoeeningen vrij sterk kunnen afwijken van de daadwerkelijke situatie. Voor de projectlocatie is dit geconstateerd voor:

Energievraagpatronen

- Ontwerpwaarden voor energievraag en piekvermogen zijn gemiddeld veel groter dan gemeten energie en piekvermogens.
- Er is een aanzienlijke spreiding in energievraag voor ruimteverwarming en koeling tussen de appartementen en tussen de verschillende jaren. Slechts enkele appartementen geven een verwarmingsvraag groter dan de ontwerpwaarde. Bewonersgedrag (thermostaat, vakantie) blijkt belangrijker dan isolatiewaarde van het appartement, expositie of verdieping.
- Tapwatervraag is veel minder variabel.

Pieklast, vermogen en duur

- Pieklast (vermogen) is over het algemeen veel kleiner dan de aanneme in het ontwerp.
- Brontemperatuur is gekoppeld met het geleverde vermogen en tijd, maar door de snel afnemende vermogensvraag is er na een initiële afkoeling sprake van een evenwicht tussen temperatuur en vermogen. Deels is dit gevolg van de relatief grote overdimensionering van de BWW's.

Vanuit het oogpunt van doelmatig gebruik van de bodem en verminderen van kosten van aanleg van GBES is het aan te bevelen de huidige praktijk van bepalen van een energievraagpatroon, gebaseerd op warmteverliesberekeningen bij relatief extreme buitencondities, te herzien. Voor het ontwerp van een GBES wordt het energievraagpatroon op de gehele operationele levensduur geprojecteerd, dit energievraagpatroon zou beter met het gemiddeld verwachte energievraagpatroon overeen moeten stemmen. De ontwerper dient daarbij wel rekening te houden met mogelijke spreiding in energievraag tussen gelijkwaardige systemen.

De ongestoorde bodemtemperatuur

- De ongestoorde bodemtemperatuur is overschat met ca. 1 °C. Dit is deels te wijten aan overschatting van het effect van de geothermische gradiënt over het eerste 100 meter dieptetraject waarbij in de eerste ± 50 meter zelfs sprake kan zijn van een omgekeerde gradiënt.

Warmtegeleidingscoëfficiënt

- De warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem is ca. 50% hoger dan verwacht: 3,0 – 3,5 W/m K in plaats van 2,0 W/m K.

De (effectieve) afstand tussen bodemwarmtewisselaars

- De boorgaten waarin de BWW's zijn geplaatst wijken met toenemende diepte af van de verticaal. Op 130 m diepte bedraagt de afwijking tussen 2 en 4 m bij een spatiëring van 8 m van de wisselaars aan maaiveld. Hierdoor kunnen de wisselaars effectief tot enkele meters dichter bij elkaar of verder uit elkaar liggen dan verondersteld.

Aanbeveling is het protocol en ontwerpdocumenten aan te passen met betrekking tot de procedures voor het bepalen van de thermische bodemparameters.

2. Een ontwerp is over het algemeen gevoelig voor bovenstaande uitgangspunten:

- Een grote en onbekende variatie in energievraag introduceert een onzekerheid in de benodigde lengte van de bodemwarmtewisselaars. Huidige praktijk van bepalen energievraag leidt vaak tot een aanzienlijke overdimensionering.
- De thermische parameters van de bodem (ongestoorde bodemtemperatuur, warmtegeleidingscoëfficiënt bodem) hebben ook een significante invloed op de benodigde hoeveelheid boormeters. Dit geldt zowel voor collectieve systemen als voor individueel geclusterde systemen.
- Voor collectieve systemen zijn variaties in de gebruikspatronen tussen individuele gebruikers vrijwel niet van invloed zolang de totale energievraag gelijk blijft. Voor een collectief systeem zijn daarom minder boormeters nodig om de prestatie van het systeem te kunnen waarborgen.
- De deviaties van de verticaal van de boortrajecten kunnen, voor situaties waar bodemwarmtewisselaars dicht op elkaar staan (< 10 meter afstand) tot een mogelijk grotere thermische interferentie leiden dan wanneer verondersteld wordt dat deze perfect verticaal geplaatst zijn. Voor collectieve systemen heeft dit geen effect, aangezien deze effecten gelijkmatig over alle bodemwarmtewisselaars verdeeld worden. Bij clusters van individuele systemen geldt dat het zeer onwaarschijnlijk is dat alle omringende bodemwarmtewisselaars naar een specifiek systeem toegericht zijn. Met andere woorden: de afwijkingen van de verticaal heffen elkaar deels op en gemiddeld zullen de cumulatieve effecten gelijk zijn. Echter, de kans dat twee boortrajecten elkaar raken blijft wel altijd aanwezig, en de mogelijkheid daartoe zou zoveel mogelijk beperkt moeten worden door het meenemen van adequate tussenafstanden binnen een ontwerp, zoals voorgeschreven in het protocol.

3. De standaard rekenmethode voor het bepalen van mogelijke negatieve interferentie kon slechts in beperkte mate worden getoetst met de monitoringsdata door onvoorziene, omstandigheden, waaronder het ontbreken van de koppeling tussen de gemonitorde appartementen en de gemonitorde bodemwarmtewisselaars en het ontbreken van de energievraag van overige omliggende bodemwarmtewisselaars die mogelijk een grotere invloed op de tijdschaal van de monitoring hebben gehad dan vooraf verwacht. Desondanks is geconstateerd dat de gemeten ontwikkeling van de bodemtemperatuur rond en tussen de gemonitorde bodemwarmtewisselaars binnen alle onzekerheden goed

valt te verklaren met een model waarin het warmtetransport in de bodem plaatsvindt door warmtegeleiding. Dit is vastgesteld voor een Feflow model waarin de bekende boorgatdeviaties waren opgenomen en waar de gemeten temperatuur in het boorgat als randvoorwaarde is toegepast, maar ook voor ITGBES-PRO, waarin een analytische oplossing voor warmtetransportberekeningen wordt gebruikt, toegepast in de standaardmethode voor interferentieberekeningen.

4. De workshop die is gehouden met stakeholders heeft geen duidelijke consensus over de noodzaak tot aanpassing van de vigerende protocollen opgeleverd. Wel is er brede steun geconstateerd voor uitbreiding van informatie (ISSO73) om de benodigde thermische bodemeigenschappen te kunnen differentiëren voor een locatie en voor het dieptetraject.

Inhoud

	Samenvatting	3
	Inhoud	8
1	Inleiding	12
1.1	OPTIGBES	12
1.1.1	Achtergrond van het project	12
1.1.2	Doel	13
1.1.3	Aanpak	13
1.1.4	Consortium	14
1.1.5	Overzicht van deliverables	14
1.2	Leeswijzer	15
2	GBES ontwerp en OPTIGBES	16
3	De monitoringslocatie	18
3.1	Projectlocatie en GBES	18
3.2	Monitoringsinfrastructuur	19
3.2.1	Bodemzijdig deel	19
3.2.2	Gebouwzijdig deel	20
3.3	Karakterisatie van de ondergrond	21
3.3.1	Bodemopbouw	21
3.3.2	Geohydrologie	22
3.3.3	Thermische bodemeigenschappen	23
4	Monitoringsdata	24
4.1	Bovengrondse gegevens	24
4.2	Ondergrondse temperatuur gegevens	24
4.2.1	Kalibratie en selectie van data	24
4.2.2	Karakteristieken van de dataset	25
4.2.3	Beeld van de dataset aan de hand van enkele visualisaties	25
4.3	Probleem koppeling monitoring bovengronds-ondergronds	29
5	Toetsing ontwerpmethoden	30
5.1	Energievraagpatronen, pieklast en rendement	30
5.1.1	Energievraagpatroon	30
5.1.1.1	Protocol/richtlijnen	30
5.1.1.2	Uitgangspunten	30
5.1.1.3	Resultaten monitoring	30
5.1.1.4	Bevindingen/boodschap	32
5.1.2	Pieklast, vermogen en duur	32
5.1.2.1	Richtlijnen	32
5.1.2.2	Uitgangspunten	32

5.1.2.3	Monitoringresultaten	32
5.1.2.4	Bevindingen/boodschap	33
5.1.3	Rendement	33
5.1.3.1	Richtlijnen	33
5.1.3.2	Uitgangspunten ontwerp	33
5.1.3.3	Monitoringresultaten	34
5.1.3.4	Bevindingen/boodschap	34
5.2	Thermische bodemeigenschappen	34
5.2.1	Ongestoorde bodemtemperatuur	34
5.2.1.1	Richtlijnen	34
5.2.1.2	Uitgangspunten	35
5.2.1.3	Resultaten monitoring	35
5.2.1.4	Bevindingen/boodschap	36
5.2.2	Warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit bodem	37
5.2.2.1	Richtlijnen	37
5.2.2.2	Uitgangspunten	37
5.2.2.3	Resultaten monitoring	37
5.2.2.4	Bevindingen/boodschap	38
5.3	Toetsing standaard rekenmodellen ontwerp (EED)	38
5.3.1	Ontwerpsoftware gesloten bodemenergiesystemen	38
5.3.1.1	Protocol/richtlijnen	38
5.3.1.2	Uitgangspunten	39
5.3.1.3	Resultaten modellering	39
5.3.1.4	Bevindingen/boodschap	42
6	Toetsing rekenmethoden interferentie	43
6.1	Modellering interferentie GBES	43
6.1.1	Protocollen en Richtlijnen	43
6.1.2	Uitgangspunten	44
6.1.3	Resultaten	44
6.1.4	Bevindingen/boodschap	49
7	Gevoeligheid ontwerpmethode voor variaties in uitgangspunten: implicaties voor ontwerppraktijk	50
7.1	Inleiding	50
7.2	Werkwijze	50
7.3	Resultaten	51
7.4	Bevindingen/boodschap	53
	Referenties	55
	Bijlagen	57
G	Beschrijving online publicatie monitoringsdata D3.1a OPTIGBES	58
G.1	Inleiding	58
G.2	Bovengrondse data	58
G.3	Ondergrondse temperatuur data en scripts	59
G.4	Scripts	60

H	Resultaten bovengrondse monitoring	61
H.1	Buitentemperatuur	61
H.2	Overzicht totaal verwarmings- en tapwatervraag appartementencomplex	62
H.3	Energievraagpatronen en SPF gemonitorde appartementen	63
H.3.1	Taprofielen	65
H.3.2	Pieklast	66
I	Resultaten monitoring DTS (ondergrondse temperatuur-evolutie)	69
J	Toetsing rekenmodellen ontwerp GBES	72
J.1	Aanpak modellering energie(piek)lasten in bodemwarmtewisselaars	72
J.1.1	Opzet Feflow model	73
J.1.2	Selectie energie(piek)vragen uit HP24 en DTS data	74
J.1.3	Variaties in thermische modelparameters	74
J.1.4	Gebruik Feflow modelpakket	75
J.2	Resultaten	75
J.2.1	Geselecteerde koudevragen	75
J.2.2	Geselecteerde warmtevragen	76
J.2.3	Resultaten modelberekeningen Feflow geselecteerde koudevraag	78
J.2.4	Resultaten modelberekeningen Feflow geselecteerde warmtevraag	80
J.3	Discussie bevindingen	81
J.3.1	Thermische parameters bodem	81
J.3.2	Eigenschappen in de praktijk optredende warmtevragen	83
J.3.3	Toetsing standaard ontwerpsoftware voor pieklasten	84
J.4	Conclusies	86
K	Toetsing rekenmethoden voor bepaling van interferentie	87
K.1	Aanpak modellering	87
K.2	Opzet Feflow model (numeriek)	88
K.3	Resultaten Feflow modellering	90
K.4	Discussie Feflow modellen	92
K.4.1	Vergelijking Feflow modellering en gemeten data diepe observatieboorgaten	92
K.4.2	Vergelijking Feflow modellering en gemeten data ondiepe observatieboorgaten	94
K.5	Opzet FLS modellering	95
K.6	Resultaten FLS modellering	95
K.7	Discussie FLS modellering	98
K.8	Conclusies	99
L	Gevoeligheid ontwerpmethode voor variaties in uitgangspunten: implicaties voor ontwerppraktijk	100
L.1	Ontwerp van geclusterde individuele GBES in de praktijk	100
L.2	Onzekerheden ontwerpuitgangspunten	101
L.3	Doel analyse	102
L.4	Methode	102
L.4.1	Earth Energy Designer berekeningen	102

L.4.2	Collectieve berekening (Methode A)	103
L.4.3	Berekening prestaties enkel systeem (input voor ITGBES-PRO; methode C)	105
L.4.4	Opzet iteratieve clusterberekeningen ITGBES-PRO (methode C)	105
L.5	Resultaten	107
L.5.1	EED berekeningen voor collectief systeem	107
L.5.2	Iteratieve berekeningen voor 46 individuele GBES met EED en ITGBES-PRO	109
L.6	Discussie	113
L.6.1	Bodemparameters	114
L.7	Conclusies	115
M	Verslag workshop implicaties OPTIGBES voor richtlijnen en protocollen - D4.2 en D5.2	117
N	Overzicht van disseminatieactiviteiten OPTIGBES – D6.1	120

1 Inleiding

1.1 OPTIGBES

Dit rapport doet verslag van het TKI Urban Energy onderzoeksproject OPTIGBES. OPTIGBES staat voor ‘*Optimalisatie inzet gesloten bodemenergiesystemen in de energietransitie; de effecten op de ondergrondtemperatuur in beeld met fibre-optic temperatuurmonitoring*’. Het project, dat is uitgevoerd in de periode 1 februari 2020 - 1 juli 2024, beoogt bij te dragen aan het vergroten van de betrouwbaarheid en economische haalbaarheid van gesloten bodemenergiesystemen (GBES⁴) en de verbetering van het doelmatig gebruik van de bodem met deze systemen.

1.1.1 Achtergrond van het project

Een GBES wordt ingezet als bron van warmte en koude voor verwarming en koeling van woningen en kleine utiliteit. Door de gunstige brontemperatuur levert een GBES een zeer hoog thermisch rendement waarmee een grote besparing op gebruik van primaire energie en emissie van broeikasgas mogelijk is. Een GBES is opgebouwd uit een of meerdere bodemwarmtewisselaars (BWW's). De meeste bodemwarmtewisselaars bestaan uit een polyethyleen leiding die in een U-vorm in een boorgat wordt aangebracht (meestal een enkele U-lus, soms een dubbele U-lus of concentrische configuratie). Het boorgat heeft een diameter van $\pm 0,15$ meter en een diepte die in Nederland grofweg varieert van 80 – 300 meter. Het boorgat waarin de bodemwarmtewisselaar is ingebouwd wordt volledig aangevuld. Door de buis stroomt een vloeistof (water of water-antivriesmengsel) die via temperatuurverschil warmte uit de bodem onttrekt (verwarmingsbedrijf), of eraan afstaat (koelbedrijf). Omdat de vloeistof door een gesloten stelsel van leidingen circuleert is er geen direct contact van die vloeistof met de bodem of het grondwater. De bodem rond de bodemwarmtewisselaar koelt af (verwarmingsbedrijf) of warmt op (koelbedrijf) waarbij warmtetransport plaatsvindt door geleiding en mogelijk grondwaterstroming. Ontwerp van een GBES heeft als doel de noodzakelijke omvang van het GBES te bepalen als functie van energiebehoefte, gewenst rendement en bodemeigenschappen waarbij de energiebehoefte voor tenminste 50 jaar gegarandeerd moet zijn. Bij het ontwerp moet rekening gehouden worden met thermische interacties (interferentie) tussen individuele BWW's van het systeem en met eventueel andere GBES in de omgeving.

Bodemwarmtewisselaars worden fabrieksmatig geproduceerd en voldoet aan de eisen uit de BRL⁵ 5219 of SKZ HR 3.26 (Protocol SIKB 11001).

GBES worden in Nederland vooral toegepast voor verwarming/koeling van individuele kleinere gebouwen (waarvan in Nederland meer dan 7 miljoen zijn). GBES vinden we voornamelijk bij nieuwbouw van woningen (grondgebonden en gestapeld) en kleine utiliteit. Voor toepassing in bestaande woningbouw worden wel technieken ontwikkeld, maar op moment van schrijven heeft GBES daar een klein aandeel. Ontwerp en realisatie van bodemenergiesystemen is in Nederland geregeld in diverse beoordelingsrichtlijnen (BRL) en protocollen (SIKB BRL 2100 en protocol 2101, SIKB BRL 11000 en protocol 11001, BRL 6000-21).

In Nederland zijn er circa 100.000 GBES en worden momenteel 15.000 tot 20.000 systemen per jaar aangelegd (CBS, 2021). Er moeten in 2050 ruim 7 miljoen woningen van het aardgas af, voor circa 20% van deze woningen is GBES de meest geschikte techniek (Naber e.a.,

⁴ GBES wordt zowel gebruikt voor de meervoudsvorm als voor enkelvoudsvorm ‘gesloten bodemenergiesysteem’.

⁵ BRL = beoordelingsrichtlijn

2016), dat betekent dat er tot 2050 circa 1-1,5 miljoen GBES kunnen worden aangelegd. Het groeitempo zou daarmee groeien tot 30.000 – 50.000 per jaar.

Gezien de grote benodigde en verwachte toename van GBES is het van belang om de ondergrondse ruimte optimaal en doelmatig te benutten voor de inzet van deze techniek. Daarvoor is het belangrijk om de BRL-en en protocollen voor ontwerp en realisatie (SIKB BRL en protocol 11000 / 11001, BRL 6000-21) kritisch te evalueren en waar mogelijk te verbeteren. In de huidige ontwerppraktijk wordt vaak uitgegaan van een “conservatief” ontwerp. Daarmee wordt beoogd een hoge mate van zekerheid te kunnen geven over de te leveren energie en rendement, ook als bijvoorbeeld de energievraag of de bodemeigenschappen afwijken van wat wordt verwacht. Tegelijkertijd kan het realiseren van systemen worden beperkt door te conservatieve inschatting van onderlinge thermische effecten (negatieve interferentie) door de daarvoor ontwikkelde vereenvoudigde methodes (SIKB protocol 8200, ITGBES).

Om meer inzicht te krijgen in de kritische stappen in ontwerp en interferentiestudies is het nodig om zowel de rekenmethoden zelf als de noodzakelijke invoergegevens tegen het licht te houden en de effecten van afwijkingen die op kunnen treden te onderkennen en te kwantificeren. Daarvoor ontbrak het voorafgaand aan het project met name aan metingen van de temperatuurverandering in en om een bodemwarmtewisselaar, als functie van energievraag, waarmee de modellen gevalideerd en invloed van ontwerp-parameters bepaald kunnen worden.

1.1.2 Doel

Het doel van OPTIGBES is om met gedetailleerde temperatuurmetingen (hoge resolutie in ruimte en tijd) in kaart te brengen wat er op een locatie met meerdere bodemlussen gebeurt, en op basis daarvan:

1. Ontwerpmethoden en standaard rekenmodellen⁶ toegepast voor ontwerp van gesloten bodemenergiesystemen te toetsen.
2. Rekenmethoden⁶ voor bepalen mogelijke negatieve interferentie te toetsen.
3. Effecten van afwijkingen in belangrijke ontwerp-randvoorwaarden (energievraagpatroon, thermische bodemeigenschappen) te bepalen.
4. Met stakeholders te verkennen of en op welke wijze de bevindingen aanleiding bieden voor mogelijke aanpassingen aan beoordelingsrichtlijnen (BRL) en protocollen voor ontwerp en realisatie van gesloten bodemenergiesystemen.

1.1.3 Aanpak

De aanpak bestond uit de volgende onderdelen:

Inrichten monitoringslocatie. Er is een monitoringslocatie gerealiseerd op het terrein van de nieuwbouw van een appartementencomplex aan de Atlantakade in het centrum van Hoogezand (Gr) met 46 appartementen. Elk van de woningen is voor warmte- en koudelevering voorzien van een warmtepomp gekoppeld aan een individuele bodemwarmtewisselaar tot ca 130 m diepte. Glasvezelkabel voor DTS (distributed temperature sensing) is bevestigd aan de bodemlussen behorende bij drie appartementen tijdens de installatie van de wisselaars, én in negen boringen rondom/tussen deze wisselaars. Gebouwszijdig zijn instrumenten geplaatst waarmee de energievraag gebouwszijdig (warmte, koude en tapwater), energieuitwisseling bodemzijdig, en de opgenomen elektrische energie van de appartementen wordt gemeten.

⁶ Deze rekenmodellen zijn gebaseerd op warmtegeleiding; situaties waarin grondwaterstromingsinvloeden afwezig/verwaarloosbaar zijn.

Karakterisatie monitoringslocatie. De ondergrond van de projectlocatie is gekarakteriseerd door middel van boorgatmetingen, declinatiemetingen, en bepalen thermische parameters door Thermische Respons Testen (TRT's).

Monitoring. Er is gedurende ruim 2,5 jaar monitoringsdata verzameld.

Analyse. Met de verkregen monitoringsdata zijn diverse analyses uitgevoerd gericht op de projectdoelen 1 t/m 3. De toetsing en effectbepaling was gericht op algemene aspecten van GBES ontwerp, niet op de beoordeling van het specifieke ontwerp van de gekozen monitoringlocatie, alhoewel in de analyse op diverse punten wel een vergelijking met het oorspronkelijke ontwerp zijn gemaakt.

Workshop. Er is een workshop gehouden met stakeholders waarin verkend is of en op welke wijze de bevindingen aanleiding bieden voor mogelijke aanpassingen aan beoordelingsrichtlijnen (BRL) en protocollen voor ontwerp en realisatie van GBES (doel 4).

1.1.4 Consortium

Het OPTIGBES onderzoek is uitgevoerd door een consortium van onderzoeksinstituten (Deltares, KWR), bedrijven (Groenholland Geo-energiesystemen BV, Nathan Projects BV) en netwerk- en brancheorganisaties (SIKB, BodemenergieNL). OPTIGBES is vanuit RVO gesubsidieerd door het TKI Urban Energie programma (projectnummer: TEUE219012). BodemenergieNL leverde met middelen van het Kennisplatform bodemenergie een aanvullende cash bijdrage aan het project.

1.1.5 Overzicht van deliverables

Tabel 1-1 geeft een overzicht van de deliverables van het OPTIGBES project en toont waar deze in het rapport zijn ondergebracht.

Tabel 1-1 Overzicht van producten (deliverables)

Product	type	Deliverable
Realisatie van een meetsite voor het monitoren van een gesloten bodemenergiesysteem; mijlpaal 1 van onderzoeksproject OPTIGBES	Deelrapport met zes bijlagen (A t/m F)	D1.1
Beschrijving (online) monitoringsdata	Hoofdstuk 4 (dit rapport)	D3.1
Toetsing ontwerpmethoden Gevoeligheid ontwerpmethode voor variaties in uitgangspunten	Hoofdstuk 5 (dit rapport) Hoofdstuk 7 (dit rapport)	D4.1a D4.1b
Toetsing rekenmethoden interferentie	Hoofdstuk 6 (dit rapport)	D5.1a
Verslag stakeholderoverleg implicaties OPTIGBES voor richtlijnen en protocollen	Bijlage M (dit rapport)	D4.2 en D5.2
Overzicht van disseminatieactiviteiten	Bijlage N (dit rapport)	D6.1

1.2 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- Hoofdstuk 2 geeft eerst een beknopt overzicht van de algemene stappen in GBES ontwerp en welke daarvan worden geadresseerd in deze studie.
- In hoofdstuk 3 wordt de gerealiseerde monitoringslocatie en het GBES toegelicht, inclusief de uitgevoerde karakterisatie van de ondergrond.
- Hoofdstuk 4 geeft een toelichting op de verkregen monitoringsdatasets.
- Hoofdstuk 5 en hoofdstuk 6 presenteren vervolgens respectievelijk de toetsing van ontwerpmethoden en van interferentieberekening.
- Een belangrijke bevinding van Hoofdstuk 5 is dat diverse uitgangspunten voor ontwerpberekeningen vrij sterk kunnen afwijken van de daadwerkelijke situatie. In Hoofdstuk 7 wordt ten slotte de gevoeligheid van ontwerp ontwerpmethoden voor deze uitgangspunten verder uitgediept.
- Veel gedetailleerde informatie over uitgevoerde analyses en de gebruikte datasets is ondergebracht in diverse bijlagen (G t/m L).
- Bijlage M bevat de verslaglegging van de OPTIGBES workshop met stakeholders.
- Bijlage N geeft een beknopt overzicht van diverse disseminatieactiviteiten van het consortium die zijn uitgevoerd gedurende de looptijd van het project.

2 GBES ontwerp en OPTIGBES

Eisen aan het ontwerp van een GBES is uitgewerkt in SIKB BRL 11000 en protocol 11001 (ondergronds ontwerp) en BRL 6000-21 (bovengronds ontwerp). De ISSO 72 (ontwerp energiecentrale kleine gesloten bodemenergiesystemen) en ISSO 73 (ontwerp ondergrondse deel gesloten bodemenergiesystemen, versie 2022) geven een gedetailleerde beschrijving van het ontwerpproces en methoden om de verschillende noodzakelijke invoergegevens te bepalen.

De bij het ontwerp meest gebruikte rekenmethoden (Earth Energy Designer of, vooral voor horizontale systemen, GlhePRO) zijn gebaseerd op warmtetransport door warmtegeleiding. Het is in die rekenmethoden niet mogelijk om warmtetransport door grondwaterstroming mee te nemen. Dit geldt ook voor het voor effectenstudie negatieve interferentie gebruikte methode ITGBES (gebaseerd op de eindige lijnbronmethode). Deze methoden worden in de overgrote meerderheid van de ontwerpen toegepast. OPTIGBES richt zich op het toetsen en waar mogelijk verbeteren van deze methoden, de monitoringlocatie is dan ook gekozen met als uitgangspunt afwezigheid van grondwaterstroming.

Grenswaarden voor de toepasbaarheid van methoden gebaseerd op geleiding (zonder grondwaterstroming) worden gegeven in rapport *GHNL 210080 Interferentie Tool Gesloten Bodemenergiesystemen Grenswaarden voor grondwaterstroming (Groenholland/SIKB 2022)*.

Voor het ontwerp wezenlijke parameters zijn onder andere de energievraagpatronen (warmtevraag, koudevraag en tapwatervraag), nodige pieklast (vermogen) en pieklastduur, systeemrendement, en thermische bodemeigenschappen. Afhankelijk van aan- of afwezigheid van grondwaterstroming wordt de toepasbare methode voor ontwerp en de interferentieberekening gekozen. Standaard gaan de methoden uit van afwezigheid van grondwaterstroming, dit dient wel in het vooronderzoek onderbouwd te worden.

Doel van het project OPTIGBES is om ontwerpprocedure, bij ontwerp toegepaste methoden en bepaling van belangrijke randvoorwaarden te toetsen en waar mogelijk te verbeteren. Het is nadrukkelijk niet het doel om het specifieke ontwerp van de gekozen monitoringlocatie te evalueren, alhoewel in de analyse op diverse punten wel een vergelijking met het oorspronkelijke ontwerp wordt gemaakt.

Tabel 2.1 geeft een overzicht van verschillende stappen die moeten worden doorlopen bij ontwerp, bijbehorende protocollen/richtlijnen, en welke van deze stappen worden geadresseerd in OPTIGBES. Deze stappen zijn overgenomen uit de ISSO 73.

Tabel 2-1 Algemene stappen in GBES ontwerp, bijbehorende richtlijnen en protocollen, en wel/niet adressering in OPTIGBES

	Stap	Richtlijnen/protocollen	Optigbes
1	Energievraagpatroon	ISSO 72, berekening warmtelast, koellast tapwaterbehoefte	Ja: monitoring bovengronds Hfst 5.1.1.
2	Pieklast (vermogen en duur)	ISSO 72, warmteverlies, koellast	Ja: monitoring bovengronds Hfst 5.1.2.
3	Keuze rendement en doeltemperatuur	Op basis opgave warmtepompleverancier, EN 14511, EN 14825	Ja: monitoring bovengronds Hfst 5.1.3.
4	Keuze rekenmethode	SIKB protocol 11001, geohydrologisch vooronderzoek	Ja: Mijlpaalrapport bijlage B; Hfst 7
4	Thermische eigenschappen bodem	SIKB protocol 11001, ISSO 73	Ja: Mijlpaalrapport bijlage C, Hfst 5.2
5	Keuze circulatiemedium	SIKB protocol 11001, ISSO 73	Nee
6	Ontwerp GBES	SIKB protocol 11001, ISSO 73	Ja; gevoeligheid ontwerp-parameters e.d. Hst 7.
7	Effectenstudie interferentie	SIKB protocol 8200	Ja: Hfst 6.

3 De monitoringslocatie

De monitoringslocatie wordt in dit hoofdstuk beknopt beschreven. Voor meer gedetailleerde informatie waaronder locatie selectie en ondergrond karakterisatie (geologie, grondwater, thermische bodemeigenschappen) wordt verwezen naar het OPTIGBES [1^e mijlpaal rapport](#) (Kooi, Witte, Doornenbal, 2021).

3.1 Projectlocatie en GBES

De monitoringslocatie voor OPTIGBES bevindt zich op het terrein van de nieuwbouw van een appartementencomplex aan de Atlantakade in het centrum van Hoogezand (Groningen) (Figuur 3-1). Op deze locatie zijn door Nathan Projects voor Stichting de Reenske Compagnie 46 appartementen gerealiseerd. Elk van de woningen is voor warmte- en koudelevering voorzien van een warmtepomp gekoppeld aan een individuele bodemwarmtewisselaar tot ca 130 m diepte.



Figuur 3-1 Locatie van het appartementencomplex aan de Atlantakade, Hoogezand) waar de OPTIGEBES monitoringslocatie is gerealiseerd (kaart: WKO-tool (04/01/2021)).

De keuze voor Atlantakade als te monitoren project is gebaseerd op een aantal selectiecriteria:

- Geen of geringe grondwaterstroming.
- Geen andere gesloten of open bodemenergiesystemen in de omgeving (voorkomen interferentie met andere niet gemonitorde systemen).
- Diepte systemen 100 – 200 meter.
- Voorkeur één individuele bodemwarmtewisselaar per warmtepomp.
- Afstand tussen de bodemwarmtewisselaars van de systemen niet te groot.
- Vermogen warmtepomp / energievraag niet te klein (condenservermogen 6 – 8 kW). Mogelijkheid aanleg monitoringsysteem op eigen terrein.
- Liefst enkele eigenaar van cluster van bodemwarmtewisselaars zoals een woningbouwvereniging.
- Gunstige opstelling van BWW's om interacties te monitoren (b.v. hofje zijn, of rijtjeswoningen waar tuinen aan achterzijde aan elkaar grenzen).
- Grondslag i.v.m. boren en verticaal houden boringen

Deze criteria waren bedoeld om een projectlocatie te selecteren waar de fundamentele principes van ontwerp en interferentieberekening van een gesloten bodemwarmtewisselaarsysteem, representatief voor in Nederland gerealiseerde systemen, met ontwerpmethoden die gebaseerd zijn op warmtegeleiding, te kunnen toetsen.

Uit een short-list van projecten geselecteerd uit het portfolio van Nathan-projects is vervolgens toestemming gekregen de locatie Atlantakade als projectlocatie te ontwikkelen.

3.2 Monitoringsinfrastructuur

De monitoringsinfrastructuur voor OPTIGBES is gerealiseerd op de noordwestzijde van het terrein en richt zich op de monitoring van drie appartementen. De infrastructuur bestaat uit een bodemzijdig en een gebouwzijdig deel.

3.2.1 Bodemzijdig deel

Het bodemzijdige deel van de infrastructuur is aangebracht rond een viertal bodemwarmtewisselaars (aangegeven met BL in Figuur 3-2; BL1a en BL1b horen bij één appartement⁷). Naast de vier bodemwarmtewisselaars monitort de infrastructuur negen boorgaten tussen en rondom de bodemwarmtewisselaars op verschillende afstanden en dieptes (aangegeven met O in Figuur 3-2). Het monitoringsysteem bestaat uit:

- A. Glasvezelkabel (Distributed Temperature Sensing, DTS); hiermee wordt de temperatuur als functie van de diepte en de tijd gemonitord in boorgaten waarin ook de bodemwarmtewisselaars zitten, alsook in boorgaten tussen de bodemwarmtewisselaars.
- B. PT 100 sensoren; deze registreren de temperatuur als functie van de tijd op de diepte in de boorgaten waarop de sensoren zijn geplaatst. Deze registraties zijn gebruikt als referentie t.b.v. de kalibratie van de DTS metingen.

⁷ De boring voor het plaatsen van de u-lus van het betreffende appartement kon niet worden gerealiseerd tot de beoogde 130 m diepte. Daarom was een extra boring noodzakelijk om voldoende energie te kunnen leveren aan het appartement.



Figuur 3-2 Overzicht van de bodemzijdige monitoringspunten. BL (rood) betreft een u-lus van een bodemwarmtewisselaar die gemonitord wordt, O (blauw) is een monitoringspunt tussen of rond de bodemwarmtewisselaars. BL# geeft de locatie van een bodemwarmtewisselaar aan die niet gemonitord wordt. De genoemde punten geven de locatie aan maaiveld. BL2 en BL3 zijn 132 m diep; BL1a en BL1b zijn parallel geschakeld (gekoppeld aan één appartement) en beide 102 m diep. Met zwarte lijnen is het verloop van de boringen aangegeven met de diepte zoals die is vastgesteld op basis van deviatie metingen in de betreffende boorgaten.

Tabel 3-1 Monitoringsput nummer, maaiveldhoogte en diepte.

Monitoringsput	maaiveld hoogte [m NAP]	diepte [m -mv]
O1B	4.2	21
O1C	4.0	21
O1D	4.0	21
O2	4.0	29
O4	3.8	133
O5	3.8	132
O6	3.8	134
O7	3.7	132
O8	4.0	131

3.2.2 Gebouwszijdig deel

Het gebouwszijdig deel van de monitoringsinfrastructuur bestaat uit een drietal energiemeters (voor bodemcircuit, tapwatercircuit en circuit ruimteverwarming), elektriciteitsmeters (kWh meters) voor de door de warmtepompen verbruikte energie en het bijbehorende monitoringsysteem (data-logger) voor drie appartementen. Ook worden de interne parameters van de warmtepompen uitgelezen en gemonitord.

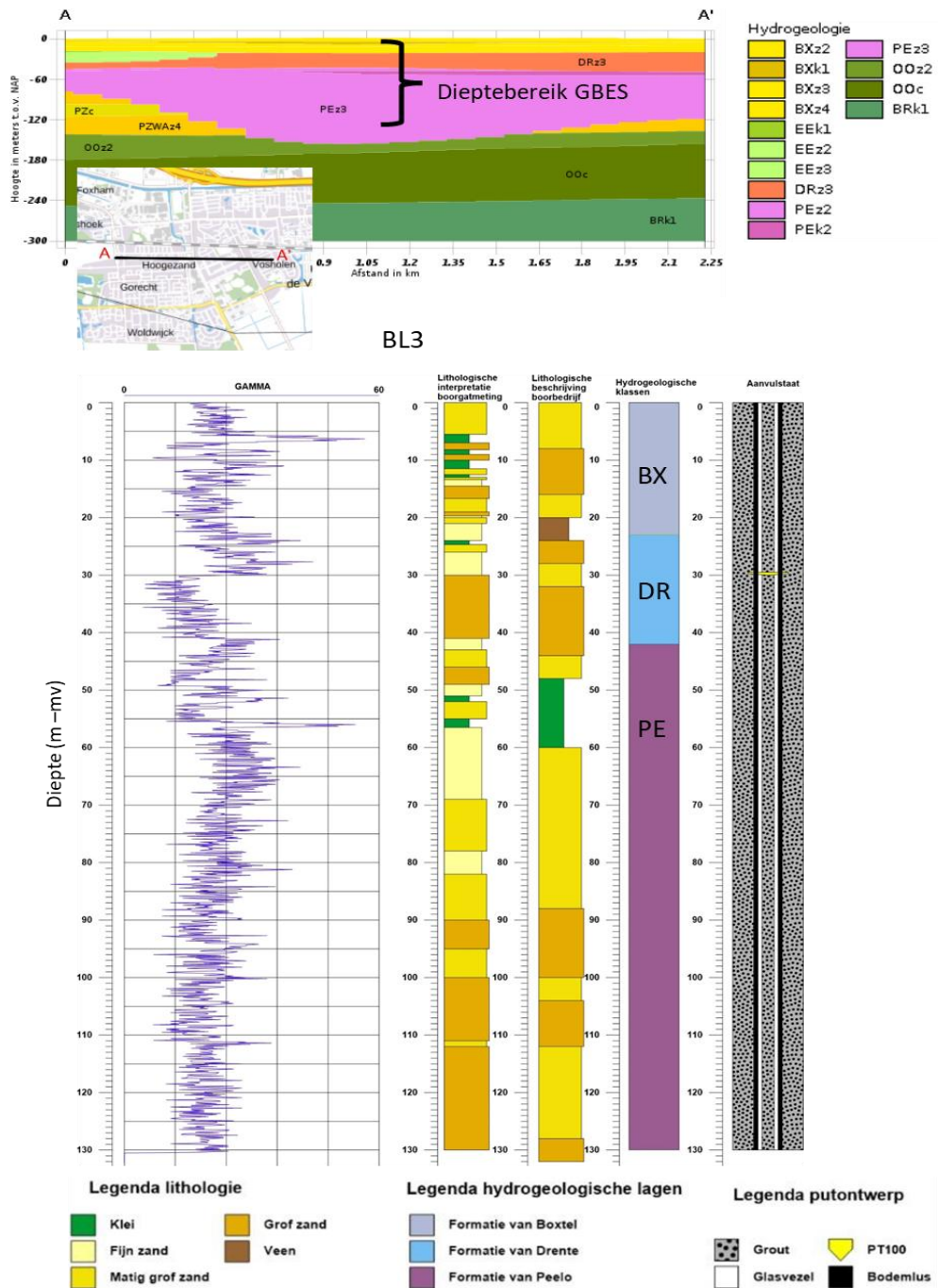
Voor elk circuit (bronicircuit, ruimteverwarming/koeling afgifte en tapwatercircuit) wordt het debiet, de aanvoer en retourtemperatuur gemeten en gelogd met een energiemeter. Deze rekent totaal debiet, vermogen, totaal geleverde warmte en totaal geleverde koude uit.

De voeding van de compressor en circulatiepomp(en) van de warmtepomp worden gemeten en gelogd voor elektrisch energieverbruik middels een kWh meter.

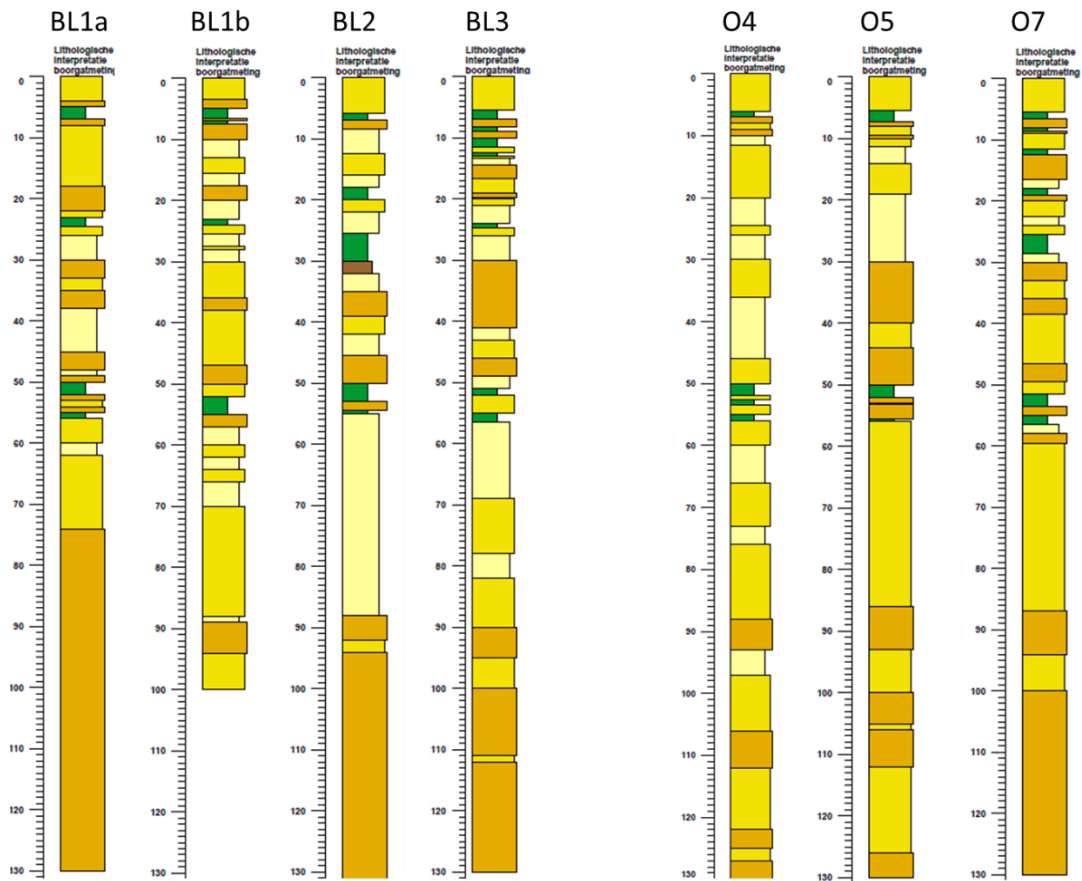
3.3 Karakterisatie van de ondergrond

3.3.1 Bodemopbouw

De ondergrond tot een diepte van 130 m -mv bestaat hoofdzakelijk uit zand in verschillende gradaties, tot ca. 60 m -mv afgewisseld met niveaus met zandige klei en kleig zand (Figuur 3-3 en Figuur 3-4). Sporadisch komt veen voor.



Figuur 3-3 Beeld van de bodemopbouw. Boven: doorsnede uit het REGIS II v2.2 model. Beneden: OPTIGBES boorgatmetingen en lithologische interpretatie voor BL3. De interpretatie op basis van de uitgevoerde geofysische boorgatmetingen (linker lithologische interpretatie) leveren een gedetailleerder beeld dan de interpretatie van het boorbedrijf op basis van de analyse van de boormonsters (rechter lithologisch profiel).



Figuur 3-4 Bodemopbouw voor zeven diepe (> 100 m) boringen op de monitoringslocatie op basis van de uitgevoerde geofysische boorgatmetingen (legenda in Figuur 3-3). Veel klei niveaus (groen) betreffen waarschijnlijk kleilenzen die een geringe verbreiding hebben in de horizontale richting.

3.3.2 Geohydrologie

De geohydrologie op basis van algemene, regionale gegevens is als volgt: Er is naar verwachting een geringe horizontale grondwaterstroming aanwezig in noord tot noordwestelijke richting. Tabel 3-2 toont de range van stromingssnelheden die zijn geschat voor twee watervoerende pakketten die van elkaar worden gescheiden door het kleiige niveau bovenin de Peelo formatie (ca. 50-55 m -mv). Verticale stroming is naar verwachting niet noemenswaardig. Het grondwater in beide watervoerende pakketten is zoet met een chloridegehalte < 150 mg/l.

Tabel 3-2 Geohydrologische schematisatie en geschatte grondwaterstromingssnelheid in de kolom 'Darcy'.

Diepte (m –mv)	Geohydrologische eenheid	Doorlatendheid (m/d)	Darcy (m/j)
0 – 11	Deklaag	-	-
11- 50	1 ^e watervoerend pakket	7 – 16	2,9 – 6,8
50 – 55	1 ^e scheidende laag	-	-
55 – 170	2 ^e watervoerend pakket	9 – 23	0,8 – 1,9
170 >	Hydrologische basis	-	-

3.3.3 Thermische bodemeigenschappen

Tabel 3-3 geeft een overzicht van de thermische bodemeigenschappen op de projectlocatie die zijn bepaald aan de hand van de Thermische Response Tests.

Tabel 3-3

Tabel 3-3 Thermische parameters bepaald met TRT voor de drie BL's. Voor elke schatting is een minimale en maximale waarde gegeven, tussen haakjes de beste schatting (gemiddelde).

Test / boring	Warmtegeleidings-coëfficiënt (W/m K)	Warmtecapaciteit (MJ/m ³ K)	Boorgatweerstand (K/(W/m))	Ongestoorde bodemtemperatuur (°C)
BL1	2,94 – 3,36 (3,15)	2,58 (2,58)	0,08 – 0,13	11,46
BL2	3,19 – 3,72 (3,28)	1,89 – 2,54 (2,13)	0,13 – 0,14	11,46
BL3	2,83 – 2,88 (2,85)	2,31 – 2,35 (2,33)	0,13 – 0,14	11,46

4 Monitoringsdata

Gedurende het project is een grote set monitoringdata verzameld. Deze gegevens set betreft zowel boven- als ondergrondse metingen aan de bodemwarmtewisselaars met een relatief hoge meetfrequentie. Om de gegevens bruikbaar te maken voor de verschillende analyses zijn de ruwe gegevens gefilterd en samengevat.

In bijlage G wordt een beschrijving gegeven van de online publicatie van de monitoringsdata en de ontwikkelde scripts. Deze datasets zijn te downloaden van www.optigbes.nl/resultaten.html

4.1 Bovengrondse gegevens

Het bovengrondse monitoringsysteem bestaat voor elk van in totaal drie appartementen uit een drietal energiemeters, twee elektrische kWh meters en een datalogger. De energiemeters meten voor drie circuits (afgiftesysteem voor ruimteverwarming en koeling, tapwater en bodemcircuit) het debiet, de aanvoer- en retourtemperatuur, vermogen en cumulatieve energie. De elektrische kWh meters meten het stroomverbruik van de warmtepomp. Aanvullend zijn gegevens voor alle appartementen op enkele momenten uitgelezen uit de Heatpump24 server van Nathan/Alpha Innotec. Gegevens over buitentemperatuur zijn gemonitord via OpenWeatherMap.

De ruwe gegevens (meetfrequentie 60 seconden) zijn samengevat tot uur-, dag en maandgegevens over de gehele beschikbare monitoringperiode. Voor gedetailleerde analyse van operationele aspecten zijn de ruwe data gebruikt. Bijlage H bevat voorbeelden van gevisualiseerde tijdreeksen en samengevatte data.

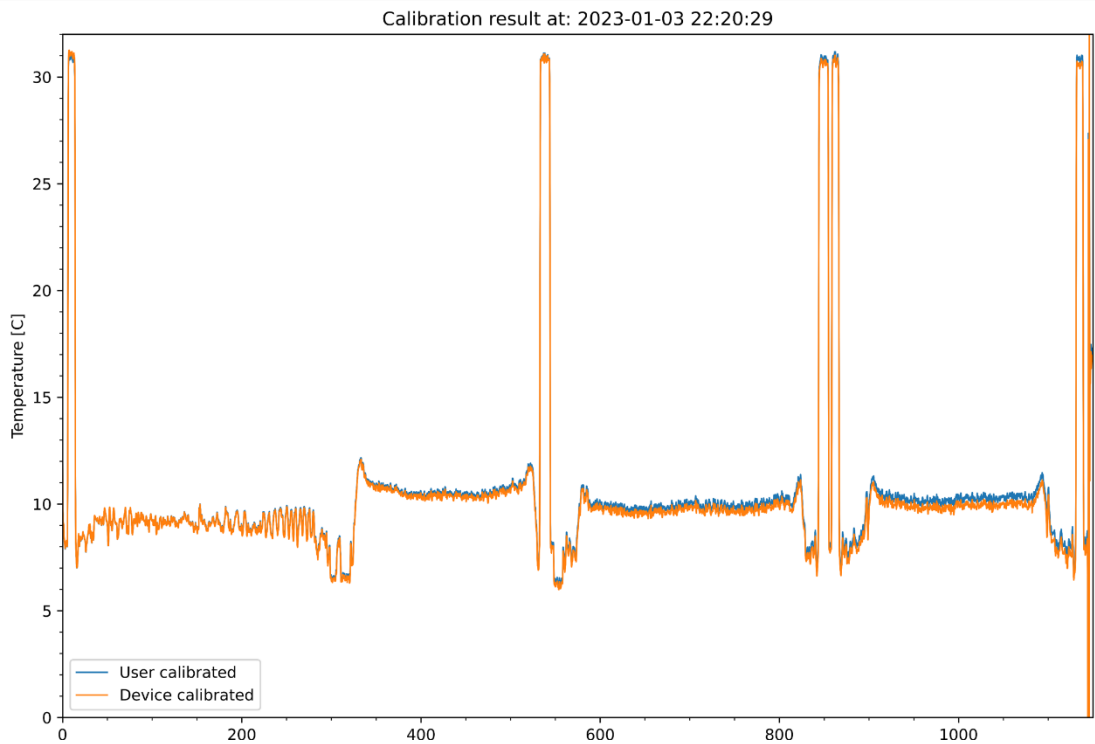
4.2 Ondergrondse temperatuur gegevens

De temperatuur monitoring van de bodemlussen en observatiepunten is uitgevoerd met de Distributed Temperature Sensing methode met de glasvezel als sensor. Het grote voordeel van het gebruik van deze techniek is dat er over grote afstanden met een hoog sample interval temperatuur gemeten kan worden.

4.2.1 Kalibratie en selectie van data

Om tot een bruikbare dataset te komen is de data eerst gekalibreerd. Vervolgens zijn de meettrajecten langs de glasvezelkabel bepaald die corresponderen met de bodemlussen en met de observatieboringen. Dit laatste is nodig omdat een individuele glasvezelkabel meerdere 'boorgaten' bemeet, en ook horizontale bodemtrajecten bevat tussen deze boorgaten. Voor de bodemlussen is ook bepaald welk traject van de glasvezelkabel correspondeert met welk been van de bodemlus. Deze informatie is terug te vinden in de beschikbare scripts.

De kalibratie is gedaan met onafhankelijke monitoring van temperatuur in baden waar de glasvezelkabel door loopt. Er is gebruik gemaakt van een warm bad met constante temperatuur en een bad met variabele omgevingstemperatuur. De kalibratie is gedaan volgens een 'single ended procedure in een double ended configuratie'. Dit houdt in dat de glasvezelkabel meerdere keren door het zelfde temperatuur bad gaat waardoor de kwaliteit van de kalibratie hoger wordt. Figuur 4-1 toont een voorbeeld van een kalibratieresultaat.



Figuur 4-1 voorbeeld van gekalibreerd resultaat van de glasvezel temperatuur data. Duidelijk te zien zijn de secties waar de glasvezelkabel door het warme bad heen gaan. Dit is te zien rond ongeveer de afstanden 15 – 20, 540 – 550, 820 – 825 en 840 – 845 en 1140 – 145 m. De constante temperatuur van het warme bad is 31 graden.

4.2.2 Karakteristieken van de dataset

De dataset beslaat de periode juni 2021 tot februari 2024. De startdatum komt ongeveer overeen met de periode dat de appartementen in gebruik zijn genomen. De monitoring is een aantal keer onderbroken door stroom uitval, reparatie aan het meetinstrument en connectie verlies met de cloud. De hiaten in de dataset zijn:

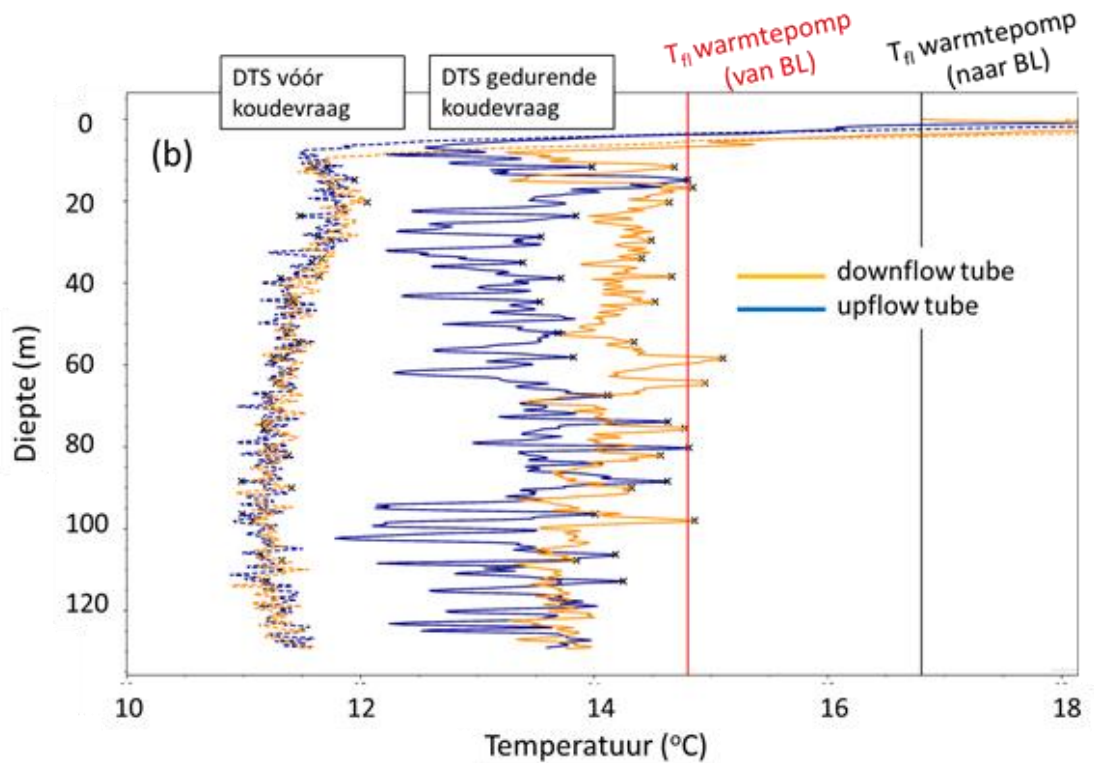
- 2022-01-12 tot 2022-01-26
- 2022-11-15 tot 2023-01-02
- 2023-04-30 tot 2023-09-01
- 2023-11-19 tot 2024-02-01

De dataset bevat temperatuurwaarden per 25 cm kabellengte/diepte. Het meetpunt bevat het gemiddelde over een afstand van 50 cm. De dataset bevat verschillende meetintervallen (resoluties) voor verschillende tijdsperioden in de dataset. De hoge resoluties zijn gebruikt voor specifieke detailanalyses van warmte- en koudevragen van de appartementen.

4.2.3 Beeld van de dataset aan de hand van enkele visualisaties

Momentopnamen van temperatuur in de boorgaten van bodemlussen

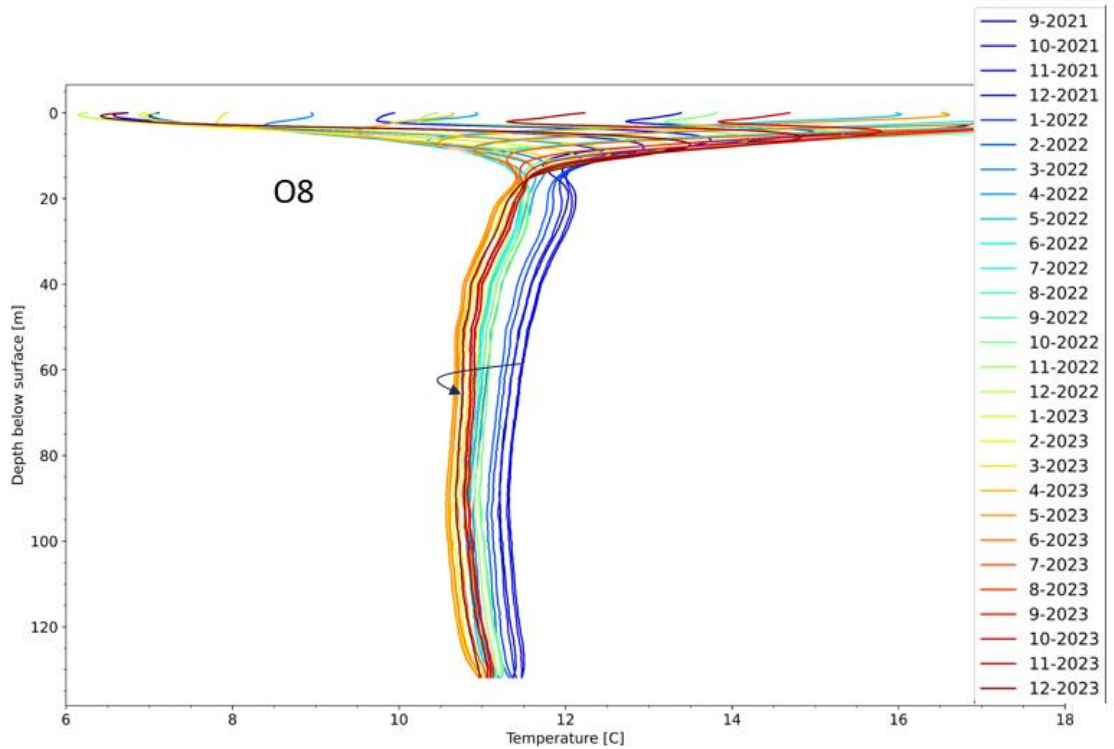
Bij de bodemlussen zijn de glasvezelkabels vastgemaakt met tape aan de beide benen van de bodemlus. Het bevestigen met tape is op onregelmatige intervallen gedaan. Het gevolg voor de temperatuur registratie van de getapete sectie ten opzichte van de secties die niet getaped zijn is dat er op deze secties een directere koppeling is tussen de buis en de vezel. Wanneer er een koude vraag of warmte vraag is vanuit de appartementen zal de respons op de temperatuurregistratie ondergronds directer op de getapete secties te zien zijn.



Figuur 4-2 Temperatuurmetingen voor en tijdens een koudevraag van een appartement en de opwarming die te zien is van de bodemlus. De twee benen van de lus worden apart getoond, aangegeven met 'downflow tube' en 'upflow tube'. Duidelijk te zien zijn de getapete delen (x) die een directere koppeling met de lus hebben, en de delen die niet getaped zijn. Ook is de gevraagde temperatuur van de warmtepomp en naar de warmte pomp in de figuur toegevoegd..

Temperatuur diepte profielen in de tijd

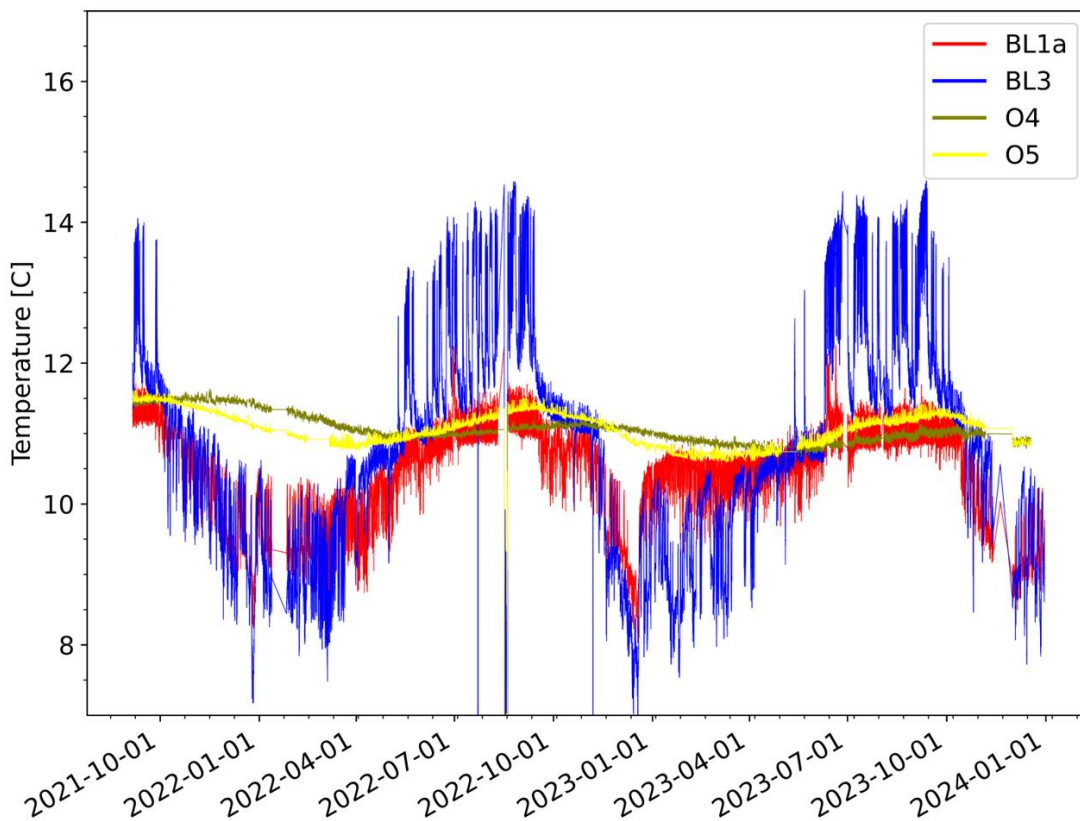
Per observatiepunt zijn temperatuur profielen met de diepte te maken (Figuur 4-3; bijlage G verwijst naar het script hiervoor). Doordat er over een looptijd van 2,5 jaar data is verzameld bestaat er de mogelijkheid de data per maand te visualiseren. De seizoens invloed tot een diepte van ongeveer 20 m -mv is zichtbaar door grote fluctuaties. Ook is een geleidelijke afname tot een diepte van ongeveer 100 m -mv zichtbaar die vervolgens over gaat naar geleidelijke toename van de temperatuur. Daarnaast is er over het gehele profiel ook een afname van de temperatuur zichtbaar (aangegeven met de pijl in het figuur) wat het effect is van het afkoelen van de bodem door de netto warmte vraag van uit de appartementen.



Figuur 4-3 Visualisatie van de temperatuurontwikkeling bij observatiepunt O8.

Gemiddelde temperaturen van 20 m-mv tot einddiepte bodemlus of observatiepunt

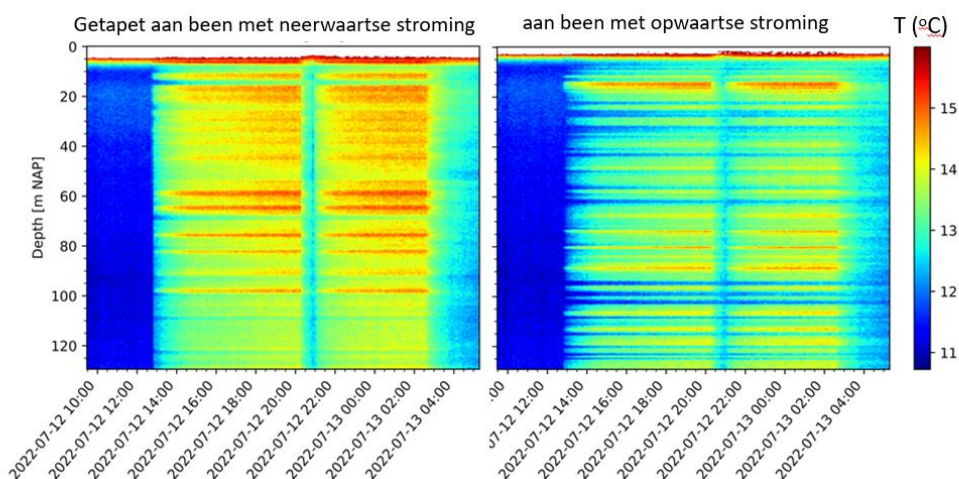
Op verschillende afstanden van de bodemlussen is het mogelijk de temperatuur verandering te bekijken per diepte. Ook is het mogelijk om gemiddelden te bepalen over dieptetrajecten. Figuur 4-4 toont de gemiddelde temperatuur dieper dan 20 m -mv voor vier boorgaten. Door het ondiepere traject weg te laten kunnen de seizoensfluctuaties die zichtbaar zijn in Figuur 4-3 buiten beschouwing worden gelaten. Deze data, en een bijbehorend script, zijn ook apart opgeslagen. Er zijn veel/alle aspecten van geleiding herkenbaar. Zo is er in de observatiepunten O4 en O5 een volledige demping te zien van de korte fluctuaties van de bodemlussen BL1a en BL3. Ook is er een gedeeltelijke demping van de laagfrequentere (seizoensale) variaties, waarbij de temperatuurveranderingen in O4 en O5 vertraagd (met een faseverschuiving) plaatsvinden ten opzichte van de veranderingen bij de bodemlussen. Zo gaat de temperatuur in O4 en O5 bijvoorbeeld nog omlaag waar de temperatuur van de bodemlussen weer stijgt. Zowel voor de bodemlussen als de waarnemingspunten is een geringe koelingstrend zichtbaar over de totale meetperiode wat wijst op een netto warmtevraag.



Figuur 4-4 Tijdreeksen van 20-130 m-mv voor BL1a, BL3, O4 en O5.

Heatmap - Voorbeeld koude vraag

Een andere mogelijkheid om de data te visualiseren is gebruik te maken van kleur om de temperatuur weer te geven. Zo is het mogelijk om diepte, tijd en temperatuur plots te maken, ook wel heatmaps genaamd. In Figuur 4-5 is een heatmap te zien van een koudevraag. Er gaat dan een relatief warme vloeistof de bodem in om het kouder terug te krijgen. De snellere respons op sommige diepte intervallen zijn de getapete secties.



Figuur 4-5 Heatmaps van BL2 tijdens een koude vraag. De linker figuur laat de neerwaartse stroming en rechts de opwaartse stroming zien

4.3 Probleem koppeling monitoring bovengronds-ondergronds

De bodemzijdige en gebouwzijdige infrastructuur voor de drie appartementen is geplaatst volgens de bestektekeningen waarop koppeling tussen de appartementen en de bodemlussen waren aangegeven. Desondanks bleek (ruim) na ingebruikname van de appartementencomplex uit analyse van de monitoringsdata, dat de gemonitorde bodemlussen niet volgens bestek waren aangesloten. De temperatuur respons van géén van de gemonitorde bodemlussen kon worden gekoppeld met de gebruiksinformatie van de drie gemonitorde appartementen.

De meeste warmtepompen in het complex sturen ook gegevens door naar de Heatpump24 server van Nathan Projects. Na uitgebreide studie van de grote datasets is alleen een koppeling gevonden voor BL2 met een appartement elders in het complex. De koppeling is vervolgens in het veld door een test met het aan en uitzetten van de warmtepomp en directe glasvezel temperatuurmetingen geverifieerd door Nathan en Deltares in mei 2023. Voor BL1 en BL3 zijn geen koppelingen gevonden.

Om dit probleem te ondervangen is het volgende gedaan:

- Voor het appartement dat gekoppeld kon worden is door Nathan een gedetailleerde dataset uit de Heatpump24 server beschikbaar gemaakt voor analyse van de DTS gegevens (paragraaf 5.3 en bijlage J).
- De bovengrondse monitoringsgegevens van de drie appartementen, waar uiteraard wel de aanvoer- en retourtemperaturen naar het bodemcircuit zijn gemeten, zijn gebruikt voor een gedetailleerde analyse van het gedrag van de bodemwarmtewisselaar (paragraaf 5.1 en bijlage H).
- Analyse van het thermische gedrag van de met DTS gemonitorde bodemwarmtewisselaars en omringende meetpunten is uitgevoerd door (hoofdstuk 6):
 - Gebruik van de gemeten temperatuurverandering in het boorgat om een numeriek model (Feflow) te forceren en de berekende temperatuurverandering in de omringende meetpunten te vergelijken met de metingen.
 - Met het eindige lijnbronmodel (fundamentele model voor bepalen interferentie) wordt eerst het energievraagpatroon geschat met de in het boorgat gemeten temperatuurverandering. Vervolgens wordt berekend wat de temperatuurverandering in de omringende meetpunten is en worden deze vergeleken met de metingen

5 Toetsing ontwerpmethoden

In dit hoofdstuk worden de volgende aspecten van een GBES ontwerp besproken, met behulp van de monitoringsdata:

- Energievraagpatroon en rendement
- Thermische bodemeigenschappen
- Modelprincipes van ontwerpsoftware

Voor elk aspect wordt kort verwezen naar de gangbare praktijk en richtlijnen die van toepassing zijn, wordt gekeken in hoeverre de monitoringresultaten daarbij aansluiten (toetsing en/of validatie), en worden de bevindingen samengevat.

5.1 Energievraagpatronen, pieklast en rendement

5.1.1 Energievraagpatroon

5.1.1.1 Protocol/richtlijnen

Bepalen van het energievraagpatroon (warmtevraag, tapwatervraag, koudevraag), pieklast (vermogen en duur) is de verantwoordelijkheid van de bovengrondse ontwerper op basis van de BRL 6000-21. Voor kleine (kleiner dan 70 kW ondergronds vermogen) is de methode voor bepalen van het energievraagpatroon uitgewerkt in de ISSO72. De basis voor het bepalen van deze parameters is een warmtelastberekening (warmteverliesberekening), een koellastberekening en een berekening voor tapwatervraag. Uitgangspunt voor de warmtelastberekening is een relatief conservatief referentieklimaat.

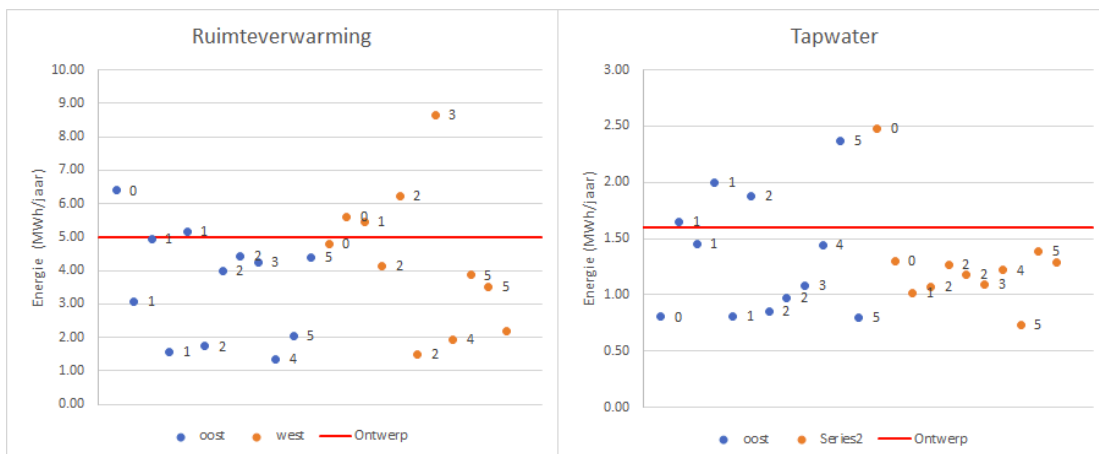
5.1.1.2 Uitgangspunten

Voor het ontwerp van het bodemenergiesysteem is de verwarmingsvraag bepaald op 5,0 MWh/appartement, de tapwatervraag op 1,6 MWh/appartement en de koelvraag op 1,2 MWh/appartement.

5.1.1.3 Resultaten monitoring

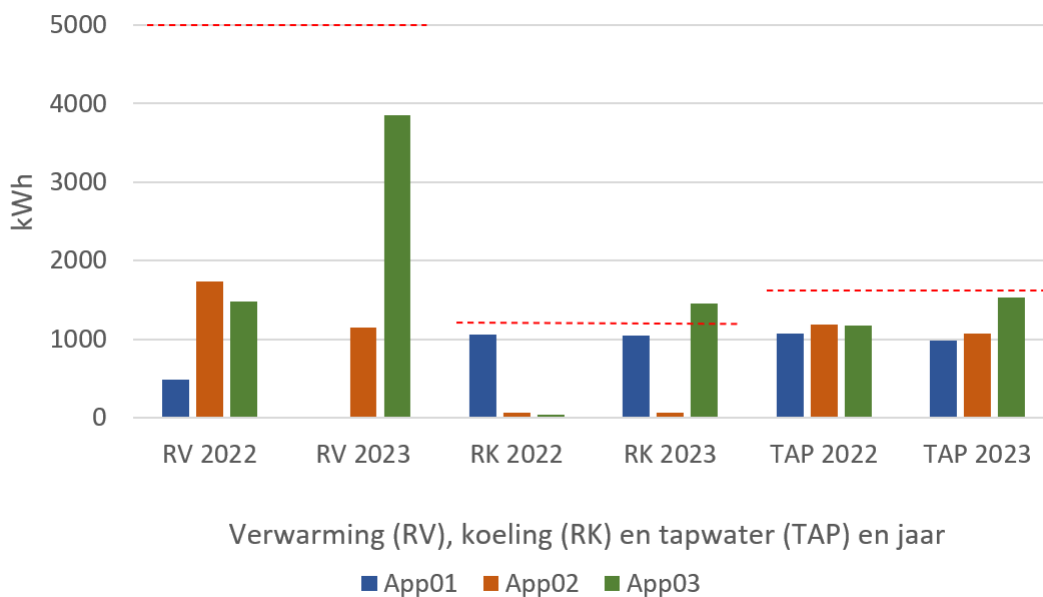
Van drie appartementen is de energievraag (verwarming en koeling, tapwater en bodemzijdige energiestroom) in detail gemonitord met energiemeters (Bijlage H). Tegelijk is de hulpenergie (energie verbruikt door warmtepomp) gemeten.

Aanvullend zijn voor alle appartementen uit de Heatpump24 server van Nathan/Alpha InnoTec op enkele momenten de totalen voor verwarmings- en tapwatervraag voor een jaar (juni 2021 tot februari 2024) uitgelezen. In Figuur 5-1 is de energievraag ruimteverwarming en tapwater berekend als gemiddeld jaartotaal, tevens is de ontwerpwaarde gegeven. Duidelijk blijkt dat in het algemeen de energievraag veel lager is dan de ontwerpwaarde, maar in enkele gevallen ook hoger. Er is geen relatie tussen expositie (oost/west) van het appartement of met de verdieping.



Figuur 5-1 Overzicht jaarlijkse energievraag ruimteverwarming en tapwater uit Heatpump24 server en ontwerpwaarde. Kleur verwijst naar expositie (oost of westelijk gelegen), nummers naar verdieping van het appartement. Rode lijn geeft de ontwerpwaarde voor ruimteverwarming en tapwater weer.

Figuur 5-2 geeft de totale gemeten ruimteverwarming, tapwater en koeling voor de drie gemonitorde appartementen weer voor de jaren 2022 en 2023. Voor zowel ruimteverwarming als ruimtekoeling blijkt een grote variatie tussen de appartementen. Voor tapwaterbereiding is de variatie aanzienlijk kleiner. Gemeten verwarmings- en koelvraag zijn beduidend kleiner dan ontwerpwaarde, ook de tapwatervraag is kleiner dan ontwerpwaarde.



Figuur 5-2 Totale vraag ruimteverwarming, tapwater en ruimtekoeling drie appartementen periode 2022 – 2023. Rode stippellijnen geven de originele jaarlijkse ontwerpwaarden weer per categorie.

5.1.1.4 Bevindingen/boodschap

Op basis van deze analyse van de monitoring energievraagpatronen van de appartementen kunnen we concluderen:

1. Ontwerpwaarden voor energievraag en piekvermogen zijn gemiddeld veel groter dan gemeten energie en piekvermogens.
2. Er is een aanzienlijke spreiding in energievraag voor ruimteverwarming en koeling tussen de appartementen en tussen de verschillende jaren. Bewonersgedrag (thermostaat, vakantie) blijkt belangrijker dan isolatiewaarde van het appartement, expositie of verdieping.
3. Tapwatervraag is minder variabel.

De protocollen voor het bepalen van de energievraag nemen als uitgangspunt een vrij conservatief referentieklimaat. Bij ontwerp van het bodemenergiesysteem wordt deze energievraag voor de hele operationele levensduur toegepast, alsof elk jaar een extreem klimaatjaar is. Dit leidt tot een intrinsieke overdimensionering van het bodemenergiesysteem. Het protocol zou een betere methode voor het bepalen van energievraagpatroon moeten definiëren waarbij rekening gehouden kan worden met verwachte variatie tussen gebruikers, variatie tussen jaren en waar rekening gehouden wordt met de opwarming over de komende ca 50 jaar.

5.1.2 Pieklast, vermogen en duur

5.1.2.1 Richtlijnen

Bepalen van het energievraagpatroon (warmtevraag, tapwatervraag, koudevraag), pieklast (vermogen en duur) is de verantwoordelijkheid van de bovengrondse ontwerper op basis van de BRL 6000-21. Voor kleine (kleiner dan 70 kW ondergronds vermogen) is de methode voor bepalen van het energievraagpatroon uitgewerkt in de ISSO72. De basis voor het bepalen van deze parameters is een warmtelastberekening (warmteverliesberekening), een koellastberekening en een berekening voor tapwatervraag. Uitgangspunt voor de warmtelastberekening is een relatief conservatief referentieklimaat.

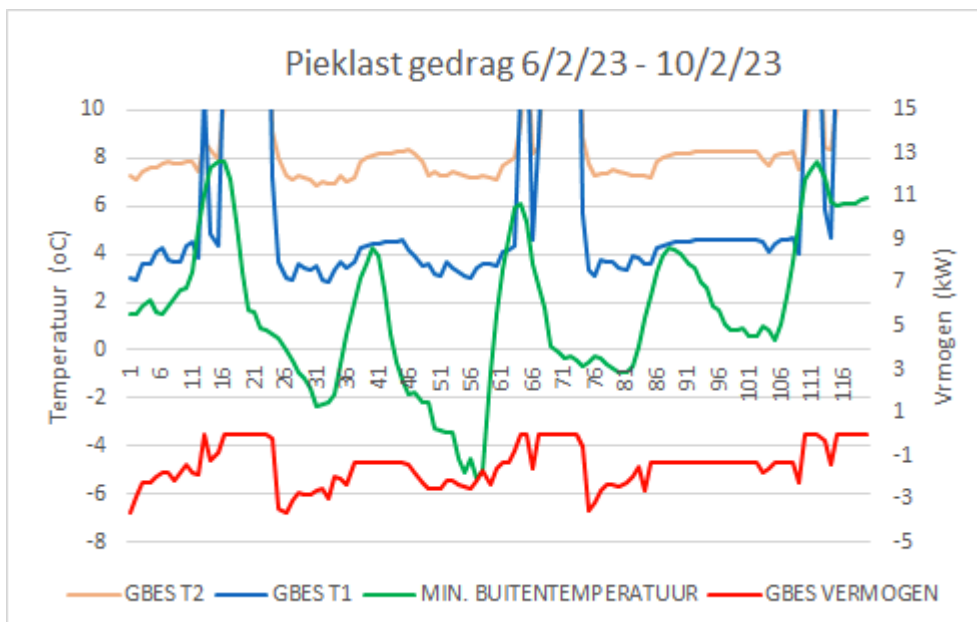
5.1.2.2 Uitgangspunten

De pieklast is bepaald op 4 kW met een duur van 6 uur (verwarming) en op 1,6 kW met een duur van 2 uur (koeling).

5.1.2.3 Monitoringresultaten

De pieklast is geanalyseerd door de frequentieverdeling van de vermogens te bepalen (Bijlage H). Voor ruimteverwarming is, voor alle drie de appartementen, het vermogen in 95% van de tijd kleiner dan 3 kW en voor twee appartementen 90% kleiner dan 2 kW. Voor tapwaterbereiding is het patroon vrijwel gelijk. Koeling laat een iets gevarieerder beeld zien, meeste vermogensvraag is tussen 2 en 3 kW, maar ook de spreiding tussen de appartementen is groot.

Figuur 5-3 geeft een representatief voorbeeld van het gedrag van het warmtepompsysteem van een appartement op enkele koude dagen (6/2/23 tot 10/2/23). Te zien is dat het vermogen (negatief aangezien warmte onttrokken wordt) nodig voor verwarming vrij klein is en na een korte piek snel afneemt. Ook is te zien dat de temperatuur in het bodemcircuit gedurende de pieklast nagenoeg constant is (de aanvangstemperatuur is hoog omdat op dat moment de bronpomp niet in bedrijf is).



Figuur 5-3 . Pieklastgedrag gedurende relatief koude periode (6 tot 10 februari 2023). GBES T1, GBES T2: retour- en aanvoertemperatuur bodemenergiesysteem, minimum buitentemperatuur en vermogen geleverd door het GBES.

5.1.2.4 Bevindingen/boodschap

1. Pieklast (vermogen) is over het algemeen veel kleiner dan aanname ontwerp.
2. Brontemperatuur is gekoppeld met het geleverde vermogen, maar over de korte tijdperiode van de pieklast is er geen afkoeling.
3. Bij ontwerp zou het maximale warmteverlies minder gewicht moeten hebben, een kort, hoog vermogen kan bij goed geïsoleerde woningen ook met kleiner vermogen gedurende langere tijd geleverd worden.

5.1.3 Rendement

5.1.3.1 Richtlijnen

Rendement (verhouding tussen geleverde energie/vermogen en verbruikte energie/vermogen) wordt bepaald op basis van informatie van de warmtepompleverancier (rendementen bepaald op basis van de ISSO73, ISSO39 en de EN 14511 - rendement warmtepomp bij specifieke bedrijfsomstandigheden) of een gelijkwaardigheidsverklaring en/of EN 14825 (bepalen seizoenmatig rendement, SPF of sCOP). De energievraagpatronen worden bij het ontwerp van het GBES vertaald van gebouwzijdig naar bodemzijdige energie met deze rendementen, waarbij de gekozen ontwerp temperatuur voor het bodemsysteem als uitgangspunt geldt (systemen met antivriesmiddel meestal tussen $-1,5$ en $+1,5$ °C, systemen met water meestal tussen $+5,0$ en $+7,0$ °C).

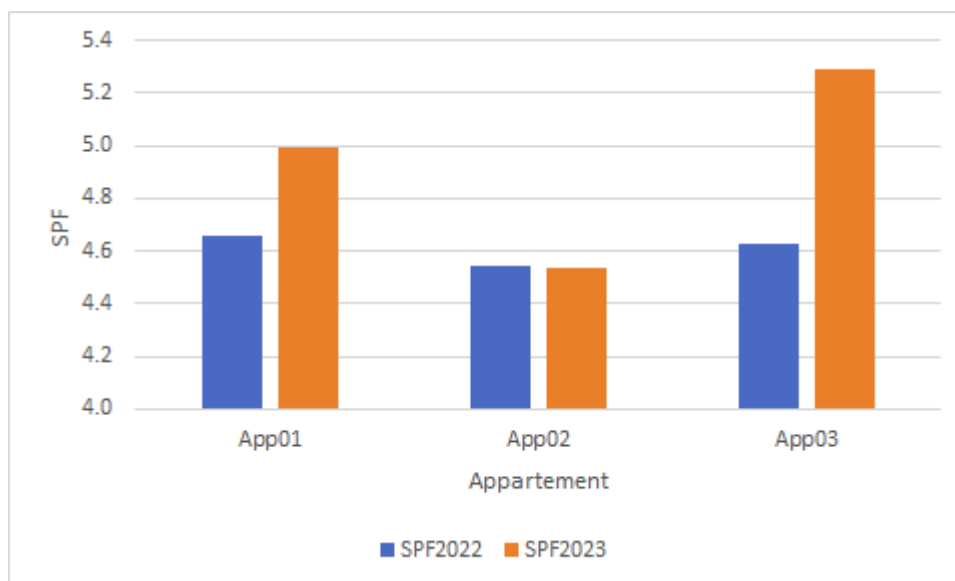
5.1.3.2 Uitgangspunten ontwerp

Seizoensmatige rendement (SPF) is 4,1 voor verwarming en gegeven bij een ontwerp-bodemtemperatuur van 0 °C en afgiftetemperatuur van 35 °C (B0W35), SPF tapwater is 2,8 bij B0W55. Koeling wordt zonder inzet van de warmtepomp gerealiseerd (passieve of vrije koeling) met een SPF van 10,3.

Totale systeem SPF bedraagt 4,78.

5.1.3.3 Monitoringresultaten

Totaal rendement is bepaald voor 2022 en 2023 (Figuur 5-4) (Bijlage H). In 2022 is het totaal rendement iets lager dan ontwerprendement, terwijl de brontemperaturen hoger zijn. In 2023 is het rendement gemeten in Appartement 1 en Appartement 3 wel significant hoger.



Figuur 5-4. Totale SPF voor de drie appartementen, periode 2022 – 2023.

5.1.3.4 Bevindingen/boodschap

Oorzaak van lager dan verwachte rendementen in 2022, ondanks hogere brontemperaturen, is het grote aandeel van kleine deellasten (overdimensionering warmtepomp vermogen) en aandeel pompenergie. Hoger rendement in 2023 voor appartement 3 is deels te verklaren door lager instellen verwarmings-setpunt i.v.m. comfort (over-verwarming appartement).

1. Het is van belang het vermogen van de warmtepomp niet te overdimensioneren en parasitaire verliezen (verbruik hulpenergie wanneer er geen vraag is) zo klein mogelijk te houden.
2. Door monitoring van buiten- en ruimtetemperaturen en deze te koppelen aan het setpunt van de warmtepomp (buitentemperatuurcompensatie) kan een optimaal setpunt voor verwarming en koeling bepaald worden.

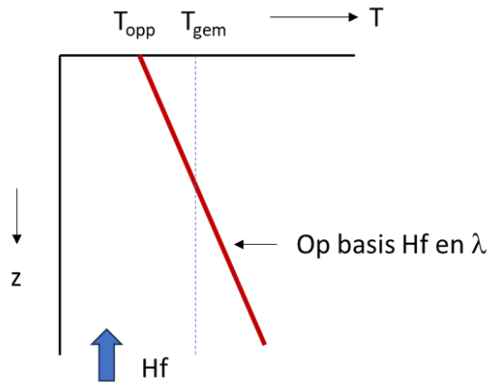
5.2 Thermische bodemeigenschappen

Protocol 11001 eist voor GBES ontwerp dat informatie wordt verzameld over 'bodtemperatuur in relatie tot de diepte', en bodemthermische parameters (warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit). Deze parameters worden vervolgens gebruikt in ontwerpberekeningen met EED of vergelijkbaar.

5.2.1 Ongestoorde bodemtemperatuur

5.2.1.1 Richtlijnen

ISSO-73 geeft aan dat voor bodemwarmtewisselaars dieper dan 20 meter de gemiddelde bodemtemperatuur wordt bepaald uit de temperatuur aan het oppervlak en de heersende geothermische gradiënt ((Figuur 5-5).



Figuur 5-5 Schematische weergave van de wijze waarop de gemiddelde bodemtemperatuur over de hoogte van de bodemwarmtewisselaar wordt bepaald (ISSO-73) aan de hand van de oppervlaktetemperatuur en 'de geothermische gradiënt' (in K/m). Wanneer de geothermische warmtestroom H_f bekend is kan de gradiënt ook worden bepaald uit H_f/λ waarin λ de (verticale) geleidingscoëfficiënt (rekenwijze in EED).

Voor de oppervlaktetemperatuur wordt in de ISSO-73 in een voorbeeld gebruik gemaakt van een langjarig gemiddelde temperatuur van KNMI station De Bilt.

5.2.1.2 Uitgangspunten

De uitgangspunten die zijn gebruikt voor de bepaling van de ongestoorde bodemtemperatuur voor het ontwerp van het GBES in Hoogezand zijn:

- warmtestroom $H_f=0,07 \text{ W/m}^2$ (standaard waarde in EED)
- geleidingscoëfficiënt $\lambda=2,0 \text{ W/mK}$.
- oppervlaktetemperatuur $T_{opp}=11,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Samen met de verkregen boorgatdiepte van 130 m levert dat een gemiddelde onverstoorde bodemtemperatuur van $12,86 \text{ }^\circ\text{C}$.

Voordat de thermische response tests zijn gedaan is door Groenholland een tweede bepaling gedaan op basis 'eigen' uitgangspunten: een lagere warmtestroom $H_f=0,05 \text{ W/m}^2$, een iets hogere geleidingscoëfficiënt $\lambda=2,24 \text{ W/mK}$ op basis van analyse van boorbeschrijvingen uit Dinoloket, en een oppervlaktetemperatuur van $10,8 \text{ }^\circ\text{C}$ op basis van gemeten gemiddelde bodemtemperatuur op 1 meter diepte bij KNMI station Nieuw-Beerta in de provincie Groningen.

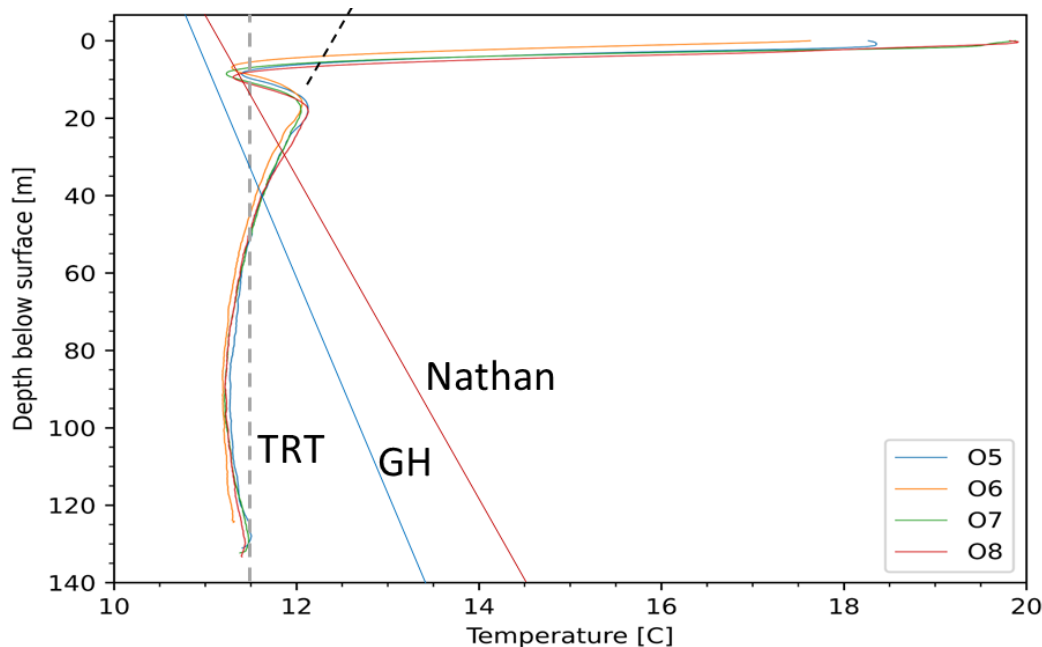
5.2.1.3 Resultaten monitoring

De monitoring laat zien dat de daadwerkelijke gemiddelde ongestoorde temperatuur over de diepte van de bodemwarmtewisselaars rond de $11,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ligt, en dus meer dan een graad lager is dan de oorspronkelijke ontwerp temperatuur (Tabel 5-1; Figuur 5-6). Dit is geconstateerd op basis van de metingen die zijn gedaan in de TRT tests, en wordt bevestigd door de DTS metingen. Figuur 5-6 laat zien dat er sprake is van een hoge oppervlaktetemperatuur van ca. $13 \text{ }^\circ\text{C}$, dat er een (lichte) afname van temperatuur met de diepte (negatieve gradiënt) aanwezig is tot ca. 90 m -mv, en er pas op grotere diepte een geleidelijke omslag is naar een positieve gradiënt. Gemiddeld genomen is er nauwelijks sprake van een gradiënt.

De bodemtemperatuur met de diepte die volgt uit de gebruikte uitgangspunten voor het ontwerp is weergegeven in Figuur 5-6.

Tabel 5-1 Verschillende bepalingen van de gemiddelde bodemtemperatuur voor projectlocatie Hoogezand

Bepaling	Gemiddelde temperatuur °C	input
Nathan (ontwerp)	12,86	11,0 °C + 2,86 °C/100 m ($\lambda=2,0$ W/mK; $H_f=0,07$ W/m ²)
GH	12,25	10,8 °C + 2,23 °C/100 m ($\lambda=2,24$ W/mK; $H_f=0,05$ W/m ²)
TRT (GH)	11,46	



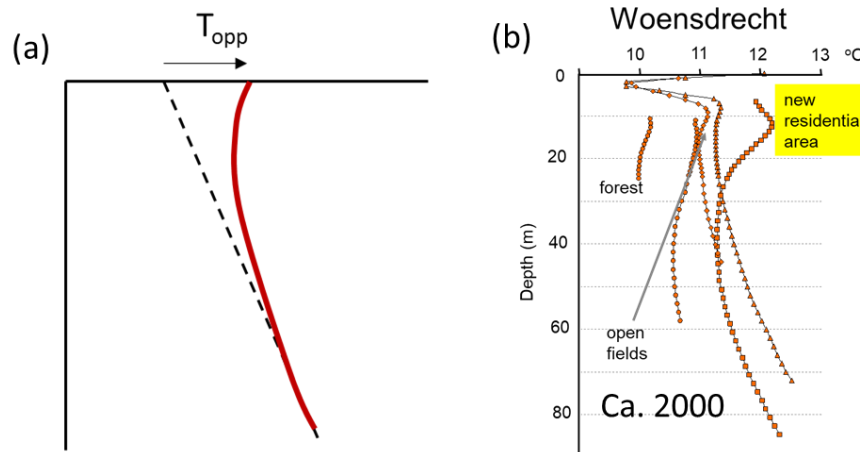
Figuur 5-6 Vergelijking van gemeten en geschatte ongestoorde bodemtemperatuur voor de monitoringslocatie Hoogezand. Lineair profiel 'Nathan' is schatting die is gebruikt voor het gerealiseerde ontwerp. Lineair profiel 'GH' is een latere schatting waarin de oppervlakte temperatuur is gebaseerd op KNMI station Nieuw Beerta (Gr) en een lagere schatting van de geothermische warmtestroom. 'TRT' is de schatting van de gemiddelde temperatuur op basis van de metingen in de thermische response tests. Curves O5 t/m O8 tonen de gemeten temperaturen met DTS in de betreffende observatieboringen (gemiddeld voor de periode 17 juli t/m 8 augustus 2021). De bovenste 15 m zijn daarin sterk beïnvloed door de oppervlaktetemperatuurvariatie met de seizoenen.

5.2.1.4 Bevindingen/boodschap

Op basis van de analyse wordt het volgende opgemerkt/geconstateerd:

1. De gangbare bepalingwijze zorgt voor deze casus voor een overschatting van de gemiddelde bodemtemperatuur van één tot bijna anderhalve graad Celsius.
2. Het concept van een lineair temperatuurprofiel (gradiënt) op basis van een geothermische warmtestroom uit de dieper ondergrond is weinig passend en een belangrijke oorzaak van de overschatting.
3. Door klimaatverandering, maar ook door ontbossing en verstedelijking is de oppervlaktetemperatuur de afgelopen vijftig tot honderd jaar toegenomen (Kooi, 2008). Daardoor is de bodem geleidelijk tot steeds grotere diepte opgewarmd; in Hoogezand inmiddels tot ca. 100 m. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 5-7a. Figuur 5-7b illustreert diverse ruimtelijke verschillen in oppervlaktetemperatuur rond het jaar 2000 in Woensdrecht en effecten van bodemopwarming in die tijd.

4. Of en op welke wijze deze effecten kunnen worden meegenomen om een betere bepaling van de gemiddelde bodemtemperatuur te verkrijgen vraagt nader onderzoek.



Figuur 5-7 (a) Schematische weergave van geleidelijke opwarming van de bodem door toename van de oppervlaktetemperatuur. (b) Gemeten temperatuurprofielen in Woensdrecht en omgeving toont opwarming van de bodem in 2000, ongeveer een kwart eeuw geleden, en ruimtelijke verschillen in oppervlaktetemperatuur in verband met verschillen in oppervlaktecondities (bos, open land, bebouwde omgeving) (niet-gepubliceerde data).

5.2.2 Warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit bodem

5.2.2.1 Richtlijnen

ISSO-73 geeft aan dat de warmtegeleidingscoëfficiënt wordt bepaald op basis van de dikte van verschillend bodemtypen zoals klei, zand en veen, die aanwezig zijn in het dieptebereik van de bodemwarmtewisselaar. De dikte van bodemtypen kan worden bepaald op boorprofielinformatie uit Dinoloket voor boringen in de nabije omgeving of op lokale gegevens die zijn verkregen voor het project. Voor elke bodemtype zijn kengetallen voor de geleidingscoëfficiënt vermeld met een bandbreedte (verzadigd en onverzadigd). De geleidingscoëfficiënt wordt bepaald als het op basis van de laagdikte gewogen gemiddelde. Voor de warmtecapaciteit kan op vergelijkbare wijze worden bepaald. In plaats van een kengetal te gebruiken voor een bodemtype kan deze ook worden berekend op basis van de gehalten van water, organische stof en mineralen.

5.2.2.2 Uitgangspunten

Voor het oorspronkelijke ontwerp is uitgegaan van een geleidingscoëfficiënt $\lambda=2,0$ W/mK en een warmtecapaciteit $cap=2,4$ MJ/m³K.

5.2.2.3 Resultaten monitoring

Tabel 5-2 toont de ontwerpwaarden voor de thermische bodemparameters samen met de gemeten waarden uit de thermische response tests.

Tabel 5-2 Vergelijking van ontwerpwaarden van de thermische bodemparameters en de waarden verkregen uit de TRT's (Tabel 3-3). Voor de TRT's is de minimale en maximale waarde aangegeven, tussen haakjes het gemiddelde.

Bepaling	Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)	Warmtecapaciteit (MJ/m ³ K)
Ontwerp	2,0	2,4
TRT: BL1	2,94 – 3,36 (3,15)	2,58 (2,58)
TRT: BL2	3,19 – 3,72 (3,28)	1,89 – 2,54 (2,13)
TRT: BL3	2,83 – 2,88 (2,85)	2,31 – 2,35 (2,33)

De resultaten laten zien dat de ontwerpwaarde van de warmtecapaciteit binnen de bandbreedte van de metingen valt. De ontwerpwaarde van de geleidingscoëfficiënt daarentegen is significant lager dan in het ontwerp was aangenomen. De hogere gemeten geleidingscoëfficiënt wordt bevestigd in de modellering (paragraaf 5.3 en paragraaf 6).

5.2.2.4 Bevindingen/boodschap

Op basis van de analyse wordt het volgende opgemerkt/geconstateerd:

1. Omdat het bodemprofiel op de projectlocatie wordt gedomineerd door zand, en zand in principe beter geleidt dan klei en leem, was het gebruikte kengetal voor zand bij de bepaling van de geleidingscoëfficiënt te laag.
2. De hoge geleidingscoëfficiënt van het Pleistocene zand in Hoogezand houdt mogelijk verband met een hoge graad van compactie die is veroorzaakt door de aanwezigheid van landijsbedekking in het verleden in Noord Nederland (Elster en Saale perioden). Daarnaast kan het zijn dat de minerale samenstelling van zand van invloed is. Het is bijvoorbeeld bekend dat de geleidingscoëfficiënt van kwarts grofweg vier maal hoger is dan van veldspaten (Revil, 2000).
3. In de recentste update van ISSO-73 is een extra bodemtype 'zand, gecompacteerd' toegevoegd met een hoger bereik van de waarde van de geleidingscoëfficiënt. Onder welke omstandigheden dit bodemtype van toepassing is, vraagt echter om nader onderzoek.

5.3 Toetsing standaard rekenmodellen ontwerp (EED)

5.3.1 Ontwerpsoftware gesloten bodemenergiesystemen

5.3.1.1 Protocol/richtlijnen

Een compleet overzicht van eisen en aandachtspunten bij ontwerp van gesloten bodemenergiesystemen staat beschreven in de ISSO 73. De SIKB BRL 11000 en protocol 11001 geven de formele eisen en richtlijnen. Ontwerp van bodemenergiesystemen wordt in Nederland uitgevoerd door partijen die voor deze richtlijnen gecertificeerd zijn.

Een essentieel onderdeel van het ontwerpproces beschreven in deze documenten, is het kiezen van een geschikt rekenprogramma om het ontwerp mee uit te voeren. Het rekenprogramma wordt gebruikt om de omvang (aantal, diepte) van het GBES te bepalen als functie van verschillende randvoorwaarden (thermische bodemeigenschappen, energievraagpatroon etc). De keuze van het rekenprogramma wordt enerzijds bepaald door het type GBES (horizontaal of verticaal) maar ook door het door het rekenprogramma toegepaste rekenmethode. Belangrijk onderscheid daarbij is of er rekening gehouden moet

worden met grondwaterstroming. De reguliere ontwerp rekenprogramma's kunnen dat namelijk niet.

Voor locaties waar door de ontwerper geen significante effecten van grondwaterstroming verwacht worden op het thermisch functioneren van de aan te leggen systemen, kan gebruik worden gemaakt van software die alleen rekening houdt met warmtetransport door geleiding. Enkele voorbeelden van dergelijke ontwerpsoftware die in protocol 11001 worden genoemd zijn: Ghlepro, DST, SBM en EED. Veruit de meeste systemen in Nederland worden met EED (Earth Energy Designer) ontworpen.

Conform het protocol wordt in de voorstudie de geohydrologische situatie op de locatie in kaart gebracht en een inschatting gemaakt van de te verwachten grondwaterstromingssnelheid. Binnen de huidige regelgeving is het in principe aan de ontwerper zelf om het geschikte model te kiezen.

5.3.1.2 **Uitgangspunten**

Het originele ontwerp voor de 46 systemen in Hoogezand is uitgevoerd met het programma Earth Energy Designer (EED), binnen Nederland en Europa een standaard rekenprogramma voor verticale gesloten bodemenergiesystemen. Binnen een EED-berekening wordt gerekend met een combinatie van twee temperatuurontwikkelingen in reactie op de activiteit van een gesloten bodemenergiesysteem:

- De lange termijn (30 - 50 jaar) temperatuurontwikkeling in de bodem en de vloeistoftemperatuur in de wisselaar, als gevolg van een jaarlijkse (on)balans tussen de warmte- en koudevraag geleverd met het systeem.
- De korte termijn temperatuurontwikkeling (meerdere uren) in de bodem en de vloeistoftemperatuur in de wisselaar, als gevolg van een directe vermogensvraag (pieklast) van enkele tot meerdere uren.

De combinatie van deze twee temperatuurontwikkelingen bij de gekozen invoerparameters wordt door het programma gebruikt om het benodigde hoeveelheid boormeters te bepalen waarbij aan het einde van de simulatie nog een bepaalde minimale vloeistoftemperatuur behaald wordt. Deze temperatuur wordt als randvoorwaarde opgegeven en komt overeen met de brontemperatuur waarbij het rendement gegarandeerd is.

5.3.1.3 **Resultaten modellering**

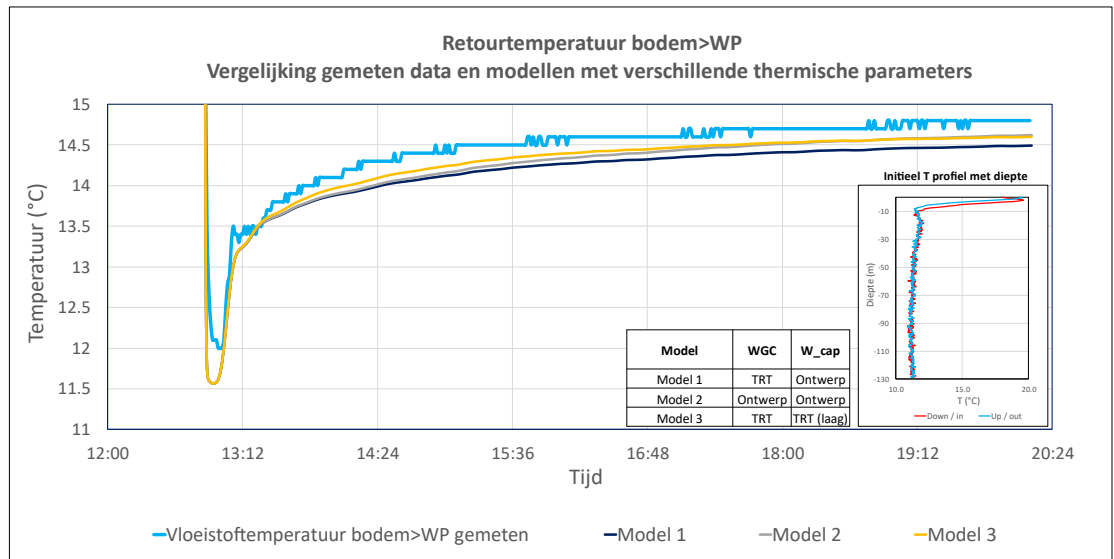
Binnen deze paragraaf wordt een analyse uitgevoerd met betrekking tot de korte termijn ontwikkeling van temperaturen in bodemwarmtewisselaars gedurende pieklasten. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen de daadwerkelijk gemeten data binnen het project (periode zomer 2021 tot winter 2024), en enkele modelsimulaties opgesteld met numerieke rekenmodel Feflow. Voor de details met betrekking tot de modelopzet zie Bijlage J.

Uiteindelijk wordt een vergelijking gemaakt tussen het geijkte Feflow model en de standaardsoftware EED om een conclusie te kunnen trekken met betrekking tot de validiteit van die 'standaardsoftware'.

In onderstaande paragraaf worden de belangrijkste resultaten uit deze analyse weergegeven. Voor een volledig overzicht van alle resultaten zie Bijlage J.

Resultaten Feflow model

Figuur 5-8 geeft een vergelijking van enkele Feflow resultaten en de daadwerkelijk gemeten data met betrekking tot de vloeistoftemperatuur tijdens een pieklast koudevraag. De betreffende Feflow scenario's gaan allen uit van een initiële temperatuurconditie variabel met diepte, maar hebben verschillende thermische parameters voor de bodem.

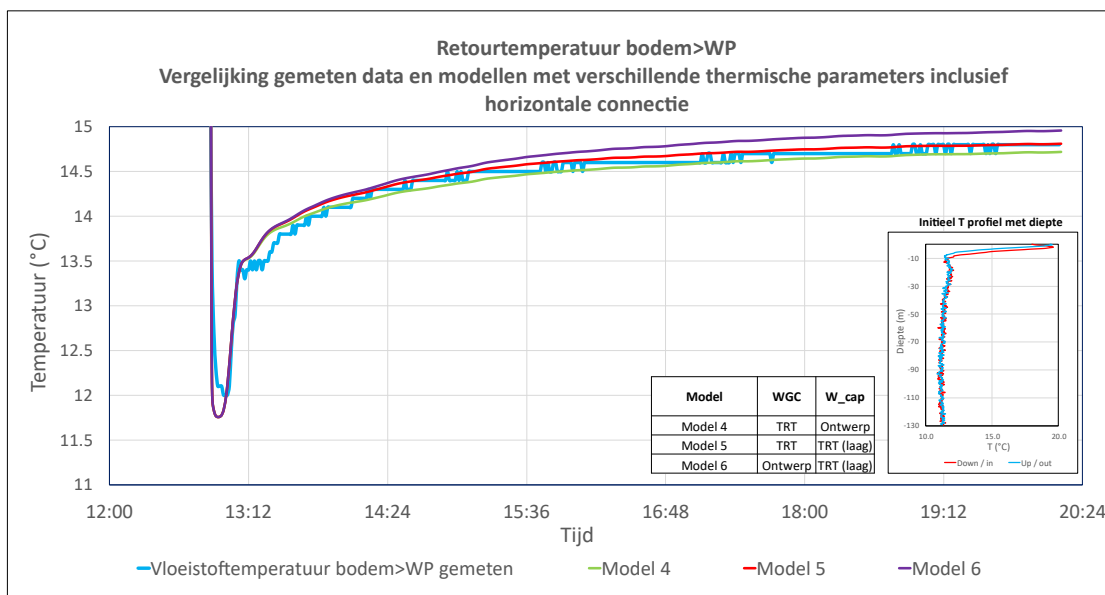


Figuur 5-8. Overzicht resultaten retourtemperaturen circulatievloeistof voor verschillende combinaties van warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit gebaseerd op het originele ontwerp en de resultaten van de TRT's.

Het doorspoelen van de lus geeft precies dezelfde reactie (vloeistoftemperatuur benaderd gemiddelde waarde gemiddelde initiële bodemtemperatuur) voor alle scenario's. Na ca. een half uur lopen de verschillende modellen wat uit elkaar wat betreft het exacte verloop van de retourtemperatuur. Het scenario met een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt en een lagere warmtecapaciteit (model 3) lijkt qua vorm hierbij de meeste overeenkomsten te hebben met de gemeten data. Desalniettemin komen alle modellen uit op een iets lagere retourtemperatuur vergeleken met de gemeten data (verschil ca. 0,2 – 0,3 K).

Het feit dat dit verschil ook aanwezig is in het begin van de energievraag tijdens het doorspoelen van de lus, lijkt erop te wijzen dat dit niet (alleen) verklaard kan worden door een verschil in thermische eigenschappen van de bodem tussen de werkelijkheid en de gedraaide modellen. Het verschil tussen de in de warmtepomp gemeten vloeistoftemperaturen en de door de modellen geproduceerde vloeistoftemperaturen zou ook te maken kunnen hebben met het horizontale traject wat nog tussen de verticale lus en het appartement (de warmtepomp) zit.

Figuur 5-9 geeft een vergelijking van enkele resultaten met betrekking tot de vloeistoftemperatuur voor dezelfde scenario's als in Figuur 5-8, alleen ditmaal met inachtneming van een horizontale connectie van ca. 10m, één meter onder het maaiveld. Hieruit blijkt dat een toevoeging van een horizontaal traject tot een betere overeenkomst leidt tussen de modelresultaten en de gemeten data.



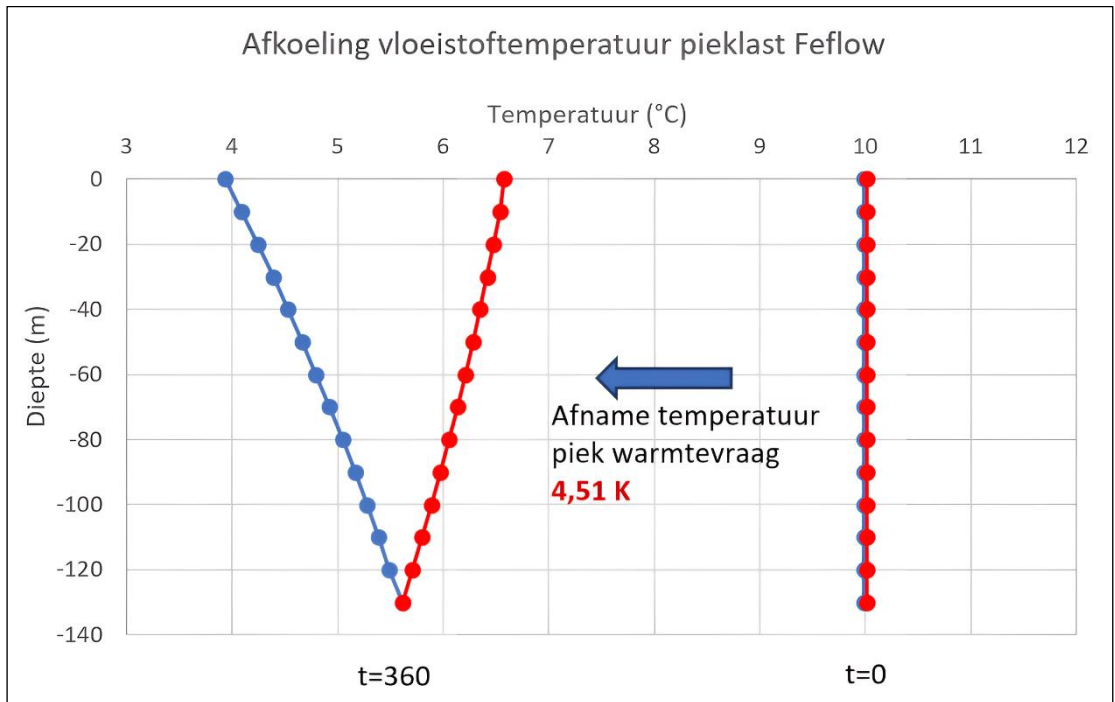
Figuur 5-9. Kwantificatie invloed horizontaal leidingtraject op verschil in gemeten en gemodelleerde retourtemperaturen tijdens een koudevraag.

Vergelijking Feflow en EED

De binnen het huidige project verkregen inzichten met betrekking tot het modelleren van individuele energievragen kunnen helpen met het toetsen in hoeverre de vaak gebruikte 'standaardsoftware' EED het effect van een pieklast adequaat kan voorspellen. De omvang en duur van een verwarmingspieklast heeft binnen deze software over het algemeen een vrij grote invloed op de voorspelde benodigde hoeveelheid boormeters om een bepaalde minimale vloeistoftemperatuur te kunnen garanderen.

Met EED kan bijvoorbeeld het effect van een geïsoleerde 4 kW (condensorzijdig) pieklast van 6 uur uitgerekend worden. Dit vermogen en de pieklastduur zijn overgenomen uit het originele ontwerp opgesteld voor de systemen binnen het project in Hoogezand. Het door EED berekende verlagingseffect op de gemiddelde temperatuur van de circulatievloeistof ten opzichte van de basislast bedraagt dan 4,49 K.

Met het Feflow model dat in staat was de respons van de geselecteerde energievragen het best na te bootsen, is vervolgens eenzelfde pieklast gesimuleerd. Figuur 5-10 geeft een grafiek met de resultaten van deze simulatie. In tegenstelling tot EED geeft het Feflow model een temperatuurverloop binnen beide benen van de U-lus dat ook diepteafhankelijk is. Vandaar dat een 'V' vorm ontstaat wanneer energie onttrokken wordt met de bodemlus. Wanneer het gemiddelde van de temperaturen uit de lusbenen echter genomen wordt, kan een temperatuur aan het einde van de 6 uur pieklast (minuut 360) van 5,49 °C berekend worden. Vanaf een uniforme initiële temperatuur van 10 °C (gelijkgezet met hoe dit in EED ingevoerd was) betreft dit derhalve een afname van 4,51 K, wat nagenoeg gelijk is aan de waarde van 4,49 K die EED uitrekende.



Figuur 5-10. Gemiddelde temperatuurafname circuliatiemidum bij verwarmingspieklast van 4 kW condensorvermogen en 6 uur pieklastduur in geoptimaliseerd Feflow model.

5.3.1.4 Bevindingen/boodschap

Op basis van de analyse wordt het volgende opgemerkt/geconstateerd:

- Invloed van de warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit van de bodem op het temperatuurverloop van de vloeistoftemperaturen tijdens kortstondige pieklasten is relatief beperkt. Desalniettemin kan op basis van de hier gepresenteerde resultaten met enige zekerheid geconcludeerd worden dat de waarden gemeten bij de TRT inderdaad een betere fit geven voor de temperatuurontwikkeling van de circulatievloeistof tussen de modelresultaten en de door de warmtepomp op locatie gemeten data.
- Het horizontale traject tussen de verticale wisselaar en het gebouw lijkt een negatief effect te hebben op de binnenkomende vloeistoftemperatuur bij de warmtepomp. Qua omvang betreft dit binnen het huidige project een relatief klein effect op het rendement, maar bij projecten met omvangrijkere verslepingen in de ondiepe ondergrond kan dit effect groter zijn.
- ‘Standaard software’ EED geeft voor een berekening van een korte termijn temperatuurverandering, als gevolg van een pieklast, geen grote verschillen ten opzichte van het gekalibreerde Feflow model. De vereenvoudigde modelprincipes van EED (en eventuele andere programma’s die gebruik maken van dezelfde aannames) lijken daarom voldoende inzicht te kunnen bieden aan dit aspect van het ontwerpproces voor een GBES.

6 Toetsing rekenmethoden interferentie

6.1 Modelling interferentie GBES

Het bepalen of er interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen op zou kunnen treden is van belang en een eis uit wet en regelgeving. Interferentie is gedefinieerd als het veroorzaken van een onvoorziene temperatuurverandering op de locatie van een ander GBES, zodanig dat het rendement van dat systeem nadelig beïnvloed wordt. Tegelijk zou een te voorzichtige (conservatieve) bepaling van interferentie tot onnodige meerkosten kunnen leiden of zelf het toepassen van GBES onmogelijk maken.

De evaluatie van interferentie is gebaseerd op een uitgebreide analyse met het numerieke model Feflow, waar de gemeten temperatuur in het boorgat gebruikt wordt om de temperatuurverandering in de waarnemingspunten te berekenen en te vergelijken met de metingen. Daarnaast is een analyse uitgevoerd met de methode zoals die ook wordt toegepast voor effectenstudies negatieve interferentie, ITGBES-PRO, gebaseerd op de eindige lijnbronmethode. Dit hoofdstuk presenteert een samenvatting van de resultaten en conclusies, Bijlage K gaat in meer detail in op de gevolgde methode en resultaten.

6.1.1 Protocollen en Richtlijnen

Een overzicht van aandachtspunten relevant voor het berekenen van de thermische effecten tussen verschillende gesloten bodemwarmtewisselaars (zowel binnen eigen ontwerp als op en van overige systemen uit de omgeving) staat beschreven in de ISSO 73. In de Bijlage 2 (Methode toetsen interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen) van de Handreikingen 8212 BUM en 8222 HUM, staan de daadwerkelijke richtlijnen welke gevolgd dienen te worden door gecertificeerde partijen in Nederland met betrekking tot het rekenen aan thermische interferentie ten opzichte van andere bodemenergiesystemen.

Het kunnen inschatten van de (lange termijn) temperatuureffecten in de bodem veroorzaakt door, en optredend tussen, verschillende bodemwarmtewisselaars, is een essentieel onderdeel van zowel het eigen ontwerp, als de wettelijke melding of vergunningsaanvraag voor een bodemenergiesysteem. Cruciaal hierbij is het kiezen van een geschikt programma om de thermische effecten mee te berekenen. Dit dient onder andere te gebeuren op basis van een inschatting van de geohydrologische kenmerken van de bodem ter hoogte van een project locatie. Binnen de huidige regelgeving is het in principe aan de (ontwerp)partijen zelf om een model te kiezen.

Voor locaties waar door de betrokken partij geen significante effecten van grondwaterstroming verwacht worden op de optredende thermische interacties tussen verschillende bodemwarmtewisselaars, kan gebruik worden gemaakt van software die alleen rekening houdt met warmtetransport door geleiding. Enkele voorbeelden van dergelijke ontwerpsoftware die in BUM BE Bijlage 2 worden genoemd zijn: ITGBES (gratis beschikbare standaard tool SIKB), Tough, ITGBES-PRO en MLU.

Veruit de meeste interferentieberekeningen in Nederland worden met software uitgevoerd die enkel uitgaat van warmtetransport door geleiding. De basis hiervoor is meestal een oplossing van de 'lijnbronmethode' (e.g. Carslaw & Jaeger 1959, Eskilson 1987, Zeng et al. 2002). Ook de standaard 'interferentietool' beschikbaar via het SIKB (ITGBES, Groenholland 2019), maakt gebruik van correlaties gebaseerd op berekeningen uitgevoerd met een dergelijk model (ITGBES-PRO).

6.1.2 Uitgangspunten

Binnen het originele ontwerp voor de 46 systemen in Hoogezand is een interferentieberekening uitgevoerd voor een simulatieduur van 25 jaar met het programma ITGBES-PRO (geen inachtnaam grondwaterstroming). Er waren geen andere relevante systemen in de directe omgeving, de berekende thermische interacties betroffen enkel de onderlinge effecten tussen de 46 aan te leggen systemen.

Het resultaat van deze berekening is verder verwerkt, en uiteindelijk is ervoor gekozen om alle systemen dezelfde bodemkoppeling (1x boring tot 130m, enkele U-lus) te geven. Hiermee wordt binnen de gevolgde procedure het beoogde rendement van alle GBES gewaarborgd.

Binnen deze paragraaf worden twee analyses uitgevoerd met betrekking tot toepasbaarheid van de gebruikte software op basis van enkel warmtetransport door geleiding, op de tijdschaal van de monitoring (periode zomer 2021 tot winter 2024).

Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen de werkelijke, met de DTS gemeten, temperaturen (op de posities van de bodemwarmtewisselaar en de daaromheen geplaatste observatie-meetpunten) en modelsimulaties uitgevoerd met het rekenmodel Feflow en ontwerpsoftware ITGBES-PRO (eindige lijnbron). Voor de details met betrekking tot de modelopzet zie Bijlage K.

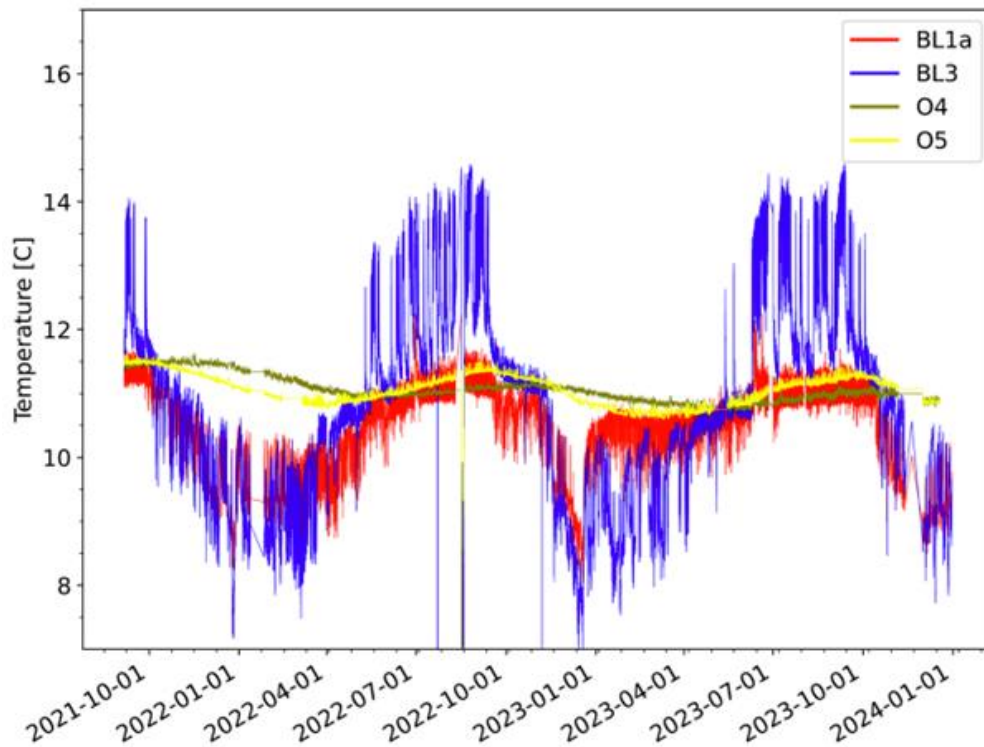
Hoofddoelen zijn te bepalen of:

- Uit de meetdata blijkt dat warmtetransport door geleiding het bepalende proces op de locatie is.
- Hoe goed de modellen in staat zijn temperatuurverandering op enige afstand van de bodemwarmtewisselaar te bepalen.

6.1.3 Resultaten

Metingen DTS bodemwarmtewisselaars en observatiepunten

Figuur 6-1 geeft DTS temperatuurmetingen voor de bodemwarmtewisselaars BL1a en BL3 en de nabijgelegen observatiepunten O4 en O5. Kwalitatief zijn er in deze figuur diverse relaties in te zien passen bij warmtetransport dat gedomineerd wordt door warmtegeleiding. Zo is er in de observatiepunten O4 en O5 een volledige demping te zien van de hoogfrequente temperatuurvariaties van de bodemlussen BL1a en BL3. Ook is er een gedeeltelijke demping van de laagfrequenter (seizoenale) variaties, waarbij de temperatuurveranderingen in O4 en O5 vertraagd (met een faseverschuiving) plaatsvinden ten opzichte van de veranderingen bij de bodemlussen. Zo gaat de temperatuur in O4 en O5 bijvoorbeeld nog omlaag waar de temperatuur van de bodemlussen weer stijgt. Zowel voor de bodemlussen als de waarnemingspunten is een geringe koelingstrend zichtbaar over de totale meetperiode wat wijst op een netto warmtevraag.



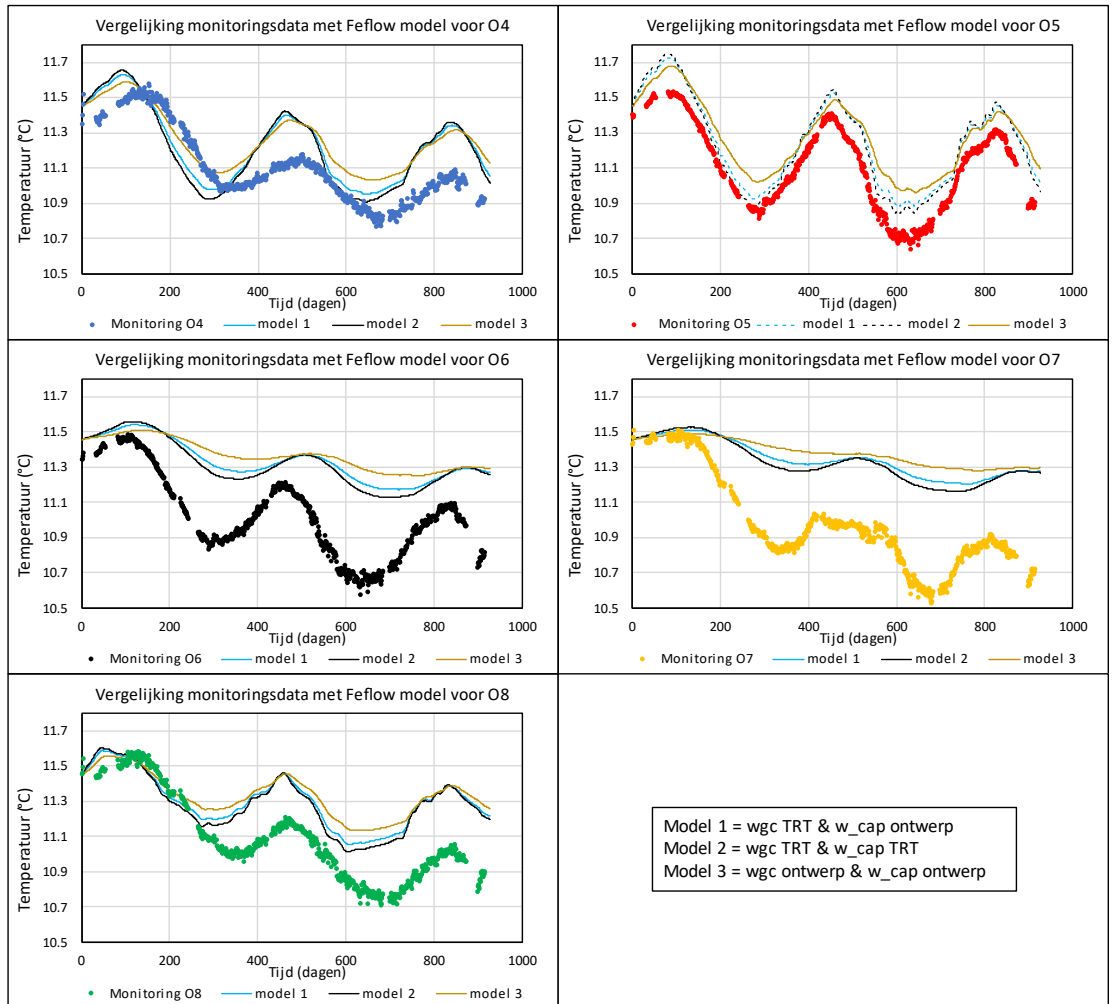
Figuur 6-1 DTS temperatuur metingen voor twee boorgaten en observatiepunten O4 en O5.

Modellerings Feflow

De Feflow modellen gebruiken de gemeten temperaturen in de drie gemonitorde bodemwarmtewisselaars als randvoorwaarde in het model. Vervolgens worden de temperaturen op de observatieboorgaten berekend.

Figuur 6-2 geeft een vergelijking van de resultaten uit verschillende Feflow modellen en de monitoringsdata voor de diepe observatieboorgaten over de diepte trajecten 20 – 130 meter. Tussen de Feflow modellen onderling zijn de verschillen in berekende temperatuur klein: maximaal 0,15K (tussen model 2 en model 3). De beste overeenkomst met de gemeten temperaturen wordt gevonden voor observatiepunt O5 voor model 2 en model 3, met een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt en lagere warmtecapaciteit (gebaseerd op de resultaten Thermische Response Test). Verschil tussen deze twee modellen is verwaarloosbaar (< 0,05K), voor model 1 (met een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt) is er wel een grotere afwijking ($\pm 0,1K$).

Bij de andere observatieboorgaten komen de gemodelleerde temperaturen minder goed overeen met de gemeten data. Voor O4 is bijvoorbeeld sprake van een veel grotere opwarming in de modelberekeningen gedurende de zomermaanden vergeleken met de daadwerkelijk gemeten temperaturen. Algemeen beeld is echter dat de gemeten temperatuurverlaging bij alle diepe boorgaten groter is dan wat er op basis van de Feflow modellen wordt berekend.



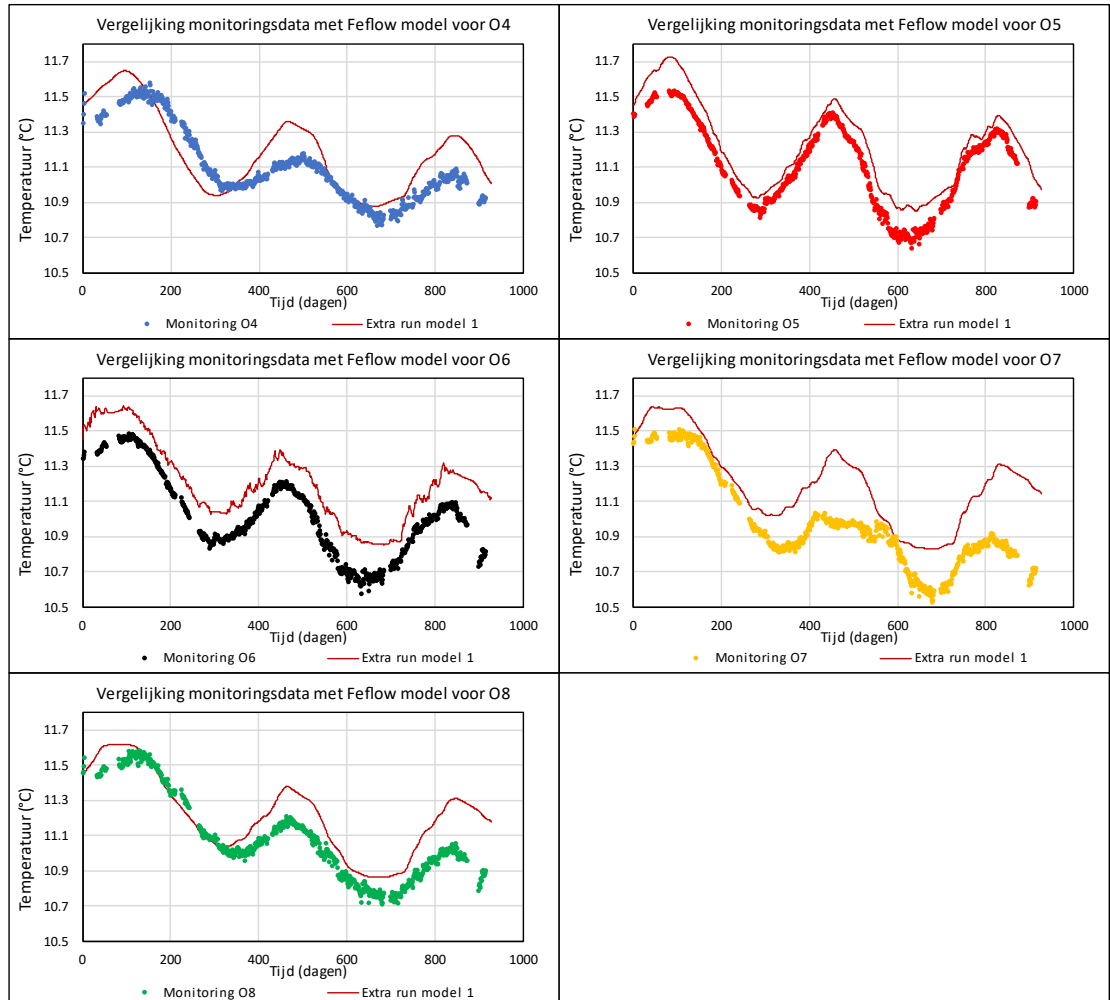
Figuur 6-2. Vergelijking resultaten verschillende Feflow modellen met gemeten data voor alle diepe observatieboorgaten. Alle weergegeven temperaturen zijn gemiddelden voor de trajecten 20 – 130 m -mv. Legenda voor modellen 1, 2, en 3 is rechtsonder gegeven. wg_c= warmtegeleidingscoëfficiënt, w_cap=warmtecapaciteit bodem

Een blik op de eerder getoonde kaart met alle bronlocaties (Figuur 3-2) kan een verklaring geven voor de verschillen in de mate van matching tussen de modelresultaten en monitoringsdata. Het valt namelijk te verwachten dat de overige (niet gemonitorde) bodemwarmtewisselaars ook een effect hebben op de observatieboorgaten, met name later in de monitoringsperiode. Relatief nabij enig observatiepunt liggen bodemwarmtewisselaars nummers 33 (10meter O6 & O7), 34 (2,5 meter, O7; 4 – 6 meter van O6 & O8), 38 (10 meter O6, O7 & O8) en 43 (7 meter, O8, 10 meter van O7) die niet gemonitord zijn. O5 (beste overeenkomst) is het boorgat wat gemiddeld het verst weg is gelegen van niet gemonitorde bodemwarmtewisselaars. O7 (grootste verschil) ligt juist relatief dicht bij een niet gemonitorde wisselaar.

De grote afwijking tussen de Feflow modellen en de gemeten data kunnen daarom verklaard worden door het gegeven dat de overige 43 bodemwarmtewisselaars uit het gehele project ook actief zijn geweest tijdens de monitoringsperiode, maar niet 'aan zijn gezet' in de Feflow modellen waarmee de resultaten uit Figuur 6-2 zijn geproduceerd.

Om het effect hiervan kwalitatief te testen, is een extra scenario van model 1 in Feflow gedraaid waarbij de knooppunten overeenkomend met enkele van de dichtstbij liggende niet gemonitorde bodemwarmtewisselaars dezelfde temperatuurforcering hebben gekregen als BL2.

Figuur 6-3 geeft de resultaten van deze extra analyse. De temperaturen in de observatieboorgaten O6, O7 en O8 laten nu een veel betere overeenkomst met de meetdata zien, door effect van de omliggende bodemwarmtewisselaars.

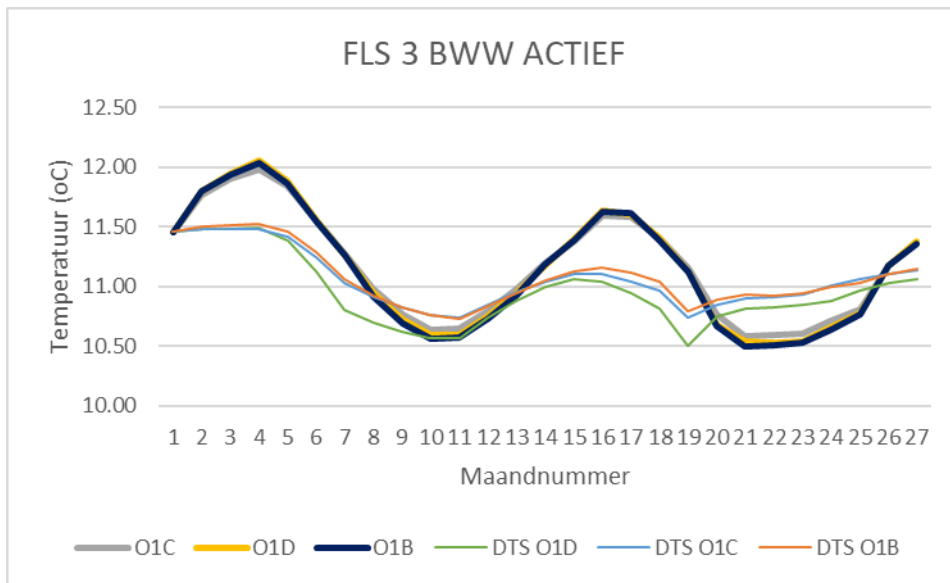


Figuur 6-3. Vergelijking resultaten extra Feflow simulatie voor model 1 met gemeten data voor alle diepe observatieboorgaten. Alle weergegeven temperaturen zijn gemiddelden voor de trajecten 20 – 130 m -mv.

Toetsing ITGBES-PRO (Eindige lijnbronmethode)

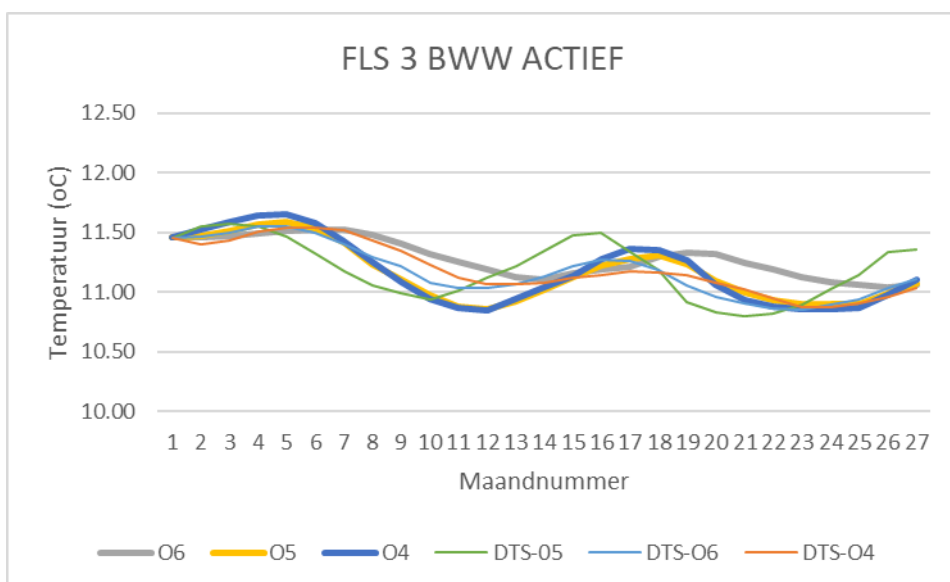
ITGBES-PRO, gebaseerd op de eindige lijnbronmethode, gebruikt informatie over het (bodempzijdige) energievraagpatroon om de temperatuurverandering in de bodem te berekenen. Omdat de bovengronds gemonitorde appartementen niet gekoppeld zijn aan het ondergrondse monitingsysteem is informatie over de bodempzijdige energievraag niet beschikbaar. Als oplossing is het energievraagpatroon voor de drie gemonitorde bodemwarmtewisselaars bepaald door een parameter-schatting uit te voeren op de met de DTS gemeten temperatuurrespons, hierbij wordt het energievraagpatroon geschat zodanig dat de berekende en gemeten temperaturen voldoende goed overeenkomen. Vervolgens zijn de berekende en gemeten temperaturen op de observatiepunten vergeleken.

De observatiepunten die vlakbij bodemwarmtewisselaar BL35 liggen (O1B, O11C en OD) laten een wat grotere afwijking zien wanneer alle drie de gemonitorde warmtewisselaars actief zijn in het model. De temperatuurverandering die berekend wordt is hoger dan de gemeten temperatuurverandering (Figuur 6-4), met name in de zomerperiode (koeling/regeneratie) zijn de afwijkingen het grootst.



Figuur 6-4. Met eindige lijnbron (FLS) berekende temperatuurverandering op ondiepe observatiepunten rondom bodemwarmtewisselaar BL35A.

Verder weggelegen observatiepunten (Figuur 6-5) laten een temperatuurverandering zien die redelijk goed overeenkomt tussen de berekening en meting. Er is wel een verschil in fase zichtbaar.



Figuur 6-5. Met eindige lijnbron (FLS) berekende temperatuurverandering op observatiepunten op enige afstand van de bodemwarmtewisselaars.

Net als bij de Feflow analyse geeft observatiepunt 7 de grootste afwijking. Bijlage K geeft de gedetailleerde resultaten.

6.1.4 Bevindingen/boodschap

Op basis van de analyses wordt het volgende opgemerkt/geconstateerd:

Feflow:

- Er blijkt een vrij groot verschil tussen de metingen en de modelberekeningen met alleen de invloed van de gemonitorde bodemwarmtewisselaars. Er is gekeken of dit verklaard kan worden door afwijkingen in thermische bodemparameters, dit lijkt niet het geval: de beste overeenkomst wordt gevonden door de thermische bodemparameters zoals bepaald bij de TRT's. Ook is te zien dat bij een aantal waarnemingspunten de overeenkomst gedurende de eerste 200 – 300 dagen vrij goed is, daarna divergeren de uitkomsten. Dit lijkt een indicatie van invloed door andere, niet gemonitorde, bodemwarmtewisselaars. Door een aantal nabijgelegen niet-gemonitorde bodemwarmtewisselaars te activeren wordt een betere overeenkomst gevonden. Hieruit kan geconcludeerd worden dat a) geleiding het overheersende proces van warmteoverdracht is en b) thermische interacties tussen de individuele bodemwarmtewisselaars als gevolg van de hoger warmtegeleidingscoëfficiënt groter is dan aanvankelijk gedacht.
- Het feit dat de resultaten uit de modellen, zonder grondwaterstroming, duidelijke overeenkomsten tonen met de gemeten data, is een goede indicatie dat modellen die alleen uitgaan van warmtetransport door geleiding in staat zijn om thermische interacties in de bodem op lange termijn adequaat in te schatten, mits de gehanteerde invoerparameters van de berekening ook kloppen.

ITGBES-PRO:

- De vergelijking tussen de gemeten temperatuurontwikkeling en de met het eindige lijnbronmodel (ITGBES-PRO) berekende temperatuurverandering zijn, gezien de onzekerheden in energievraagpatroon, goed. Verschil tussen berekende en gemeten temperaturen bedraagt $\pm 0,5K$. Een groot deel van die verschillen komt voort uit een overschatting van de koelvraag (die niet gemeten is) en verschil in fase.
- Globale trend van afkoeling door warmte-onttrekking wordt door de FSL methode goed voorspeld.
- Het ontbreken van de koppeling gemonitorde energievragen en gemonitorde bodemwarmtewisselaars, in combinatie met de onzekerheden met betrekking tot de invloed de overige bodemwarmtewisselaars (zowel qua energievraag, als qua deviatie van de boortrajecten), maakt het moeilijk om kwantitatief verder duidelijke conclusies te trekken.

7 Gevoeligheid ontwerpmethodes voor variaties in uitgangspunten: implicaties voor ontwerppraktijk

7.1 Inleiding

Een compleet overzicht van aandachtspunten relevant voor het ontwerpen van clusters gesloten bodemwarmtewisselaars (zowel met betrekking tot effecten binnen eigen ontwerp als effecten op en van overige systemen uit de omgeving) staat beschreven in de ISSO 73. Binnen SIKB BRL 11000 en protocol 11001 staan de daadwerkelijke richtlijnen welke gevolgd dienen te worden door gecertificeerde ontwerpers in Nederland.

Het ontwerp van een GBES moet garanderen dat het systeem voor de levensduur van het systeem (bijv. 30 jaar) moet kunnen voorzien in de benodigde ontwerpeisen (pieklast (kW), netto warmteonttrekking (MWh/j) en de minimaal toelaatbare vloeistoftemperatuur (bijv. 0 °C). Bij het ontwerp van meerdere BWW's die op korte afstand bij elkaar staan moet dus zowel het gedrag van de individuele BWW's, als het effect van nabijgelegen BWW's worden meegenomen. Dit geldt zowel voor collectieve systemen (BWW's zijn aan elkaar verbonden, er wordt 1 temperatuur geproduceerd) als voor geclusterde individuele GBES. Voor de locatie te Hoogezand is initieel een (cluster)ontwerp opgesteld voor 25 jaar (zie overige paragrafen voor details met betrekking tot origineel ontwerp). Op basis van de monitoring binnen het OPTIGBES-project blijken er echter enkele significante verschillen te zijn tussen de uitgangspunten van het originele ontwerp en de daadwerkelijk gemeten data. Hieronder een opsomming van de belangrijkste waarnemingen:

- Significante deviaties van boortrajecten met diepte
- Lagere initiële gemiddelde bodemtemperatuur over boortraject
- Hogere gemiddelde warmtegeleiding over boortraject
- Grote verschillen in energievraag tussen gebruikers, en ten opzichte van de ontwerpwaarden

In dit hoofdstuk wordt uitgezocht wat het effect van deze onzekerheden op het ontwerp (minimaal benodigde boormeters) van GBES is, zowel voor collectieve systemen als voor geclusterde individuele GBES (zoals het systeem in Hoogezand). Zie Bijlage L voor verdere beschrijving en uitleg.

7.2 Werkwijze

Twee typen analyses zijn uitgevoerd om de schaal van de afname of toename in boormeters inzichtelijk te maken voor variaties in de genoemde parameters (gevoeligheidsanalyse):

1. Analyse collectieve ontwerpen middels Earth Energy Designer (EED).
2. Analyse Iteratieve ontwerpen met EED en ITGBES-pro, voor geclusterde individuele systemen.

Alle analyses gebruiken een geometrie overeenkomstig met of afgeleid van de projectlocatie te Hoogezand. Het effect van variërende initiële bodemtemperatuur, de thermische geleidbaarheid en het energieprofiel (netto warmteonttrekking MWh/j) is berekend. De range aan gevarieerde parameterwaarden is gekozen op basis van de gemeten data in Hoogezand. Zie bijlage L voor verdere beschrijving en uitleg. Op basis van de bevindingen uit deze analyses worden vervolgens generieke lessen voor het ontwerp van vergelijkbare projecten in kaart gebracht en samengevat.

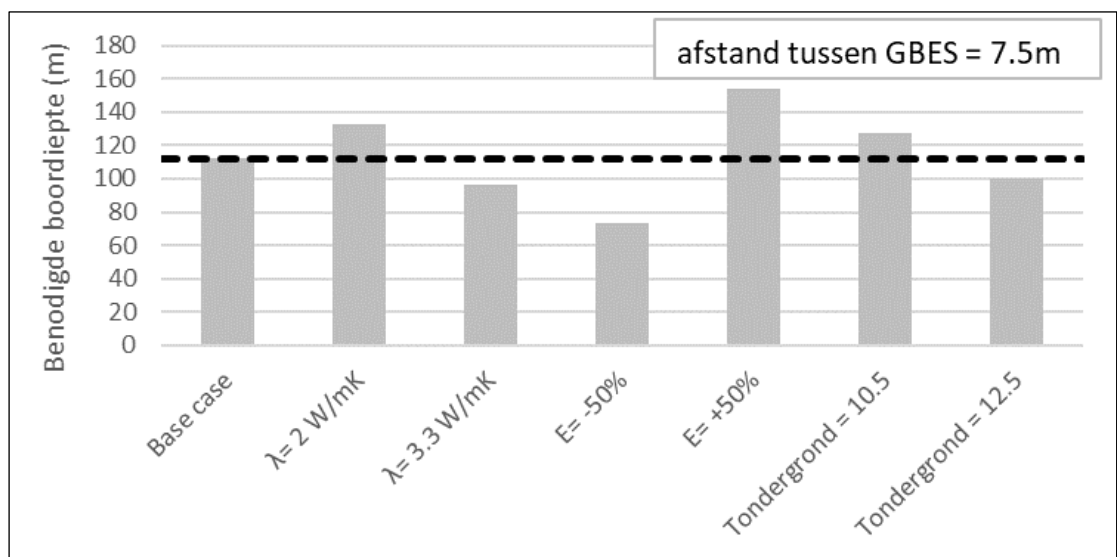
Door de deviaties in boortrajecten zal niet per definitie een significant verschil in thermische effecten optreden binnen geclusterde (of collectieve) ontwerpen. Alhoewel boringen die over hun gehele traject dichterbij elkaar komen dan in een ontwerp voorzien elkaar inderdaad meer zullen beïnvloeden, betekent een kleinere afstand naar de ene richting ook een grotere afstand naar eventuele wisselaars in de tegengestelde richting. Zeker bij geclusterde systemen zullen de effecten van kleinere en grotere afstanden tot nabijgelegen wisselaars elkaar gemiddeld genomen grotendeels opheffen (zie Bijlage L voor voorbeelduitwerking).

7.3 Resultaten

De benodigde boordiepte voor alle BWW's van het collectieve systeem om aan de ontwerpeisen te voldoen na 30 jaar gebruik (vloeistoftemperatuur $>0^{\circ}\text{C}$ tijdens pieklast in winter jaar 30) voor de base case ($\lambda=2,65$, E =standaard (178 MWh/j netto warmteonttrekking), T -ondergrond = 11,5, zie bijlage L) is 112 m (1e kolom en stippellijn in figuur 7-1). Voor de gevarieerde parameters heeft het energieprofiel van de GBES de grootste invloed op de benodigde boordiepte.

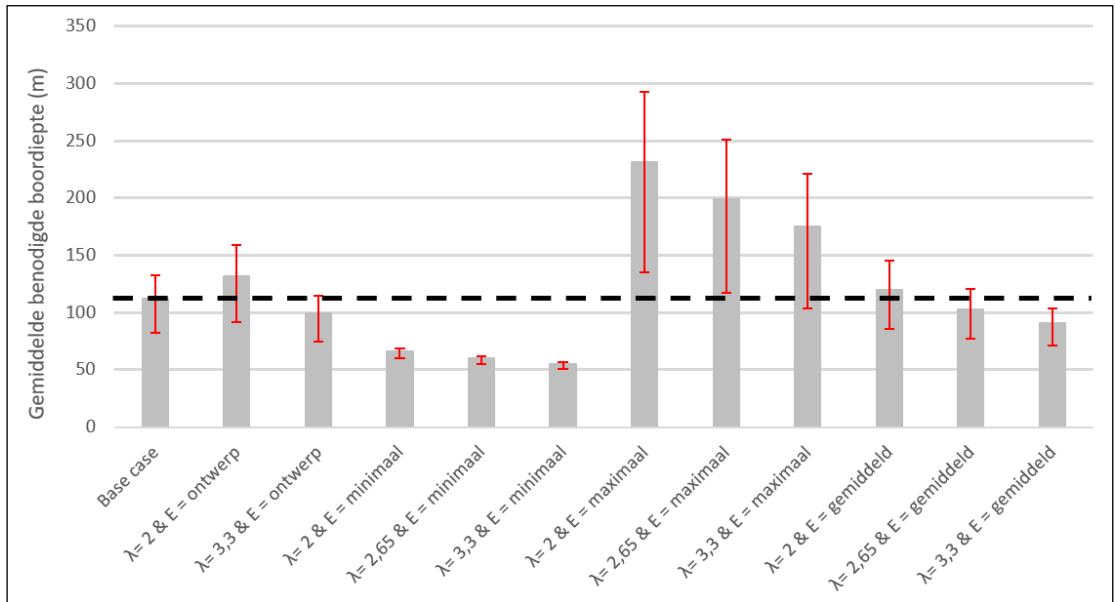
Met een lagere warmtegeleidingscoëfficiënt van 2 W/mK neemt de toevoer van warmte af richting het afgekoelde bodemvolume en is er dus meer boordiepte (een groter bodemvolume van het totale systeem) benodigd van 133m om te voldoen aan de ontwerpeisen. Bij toename van de thermische geleidbaarheid neemt de benodigde boordiepte af tot 96,5m. De netto warmteonttrekking voor het collectieve GBES is voor de base case 178 MWh/j. Wanneer de netto warmteonttrekking 50% afneemt tot 89 MWh/j, neemt ook de benodigde boordiepte af, met 33% tot 74m. Met een toename van de netto warmteonttrekking tot 267 MWh/j neemt de benodigde boordiepte toe tot 154m (+37,5%).

Het effect van $+1^{\circ}\text{C}$ of -1°C bodemtemperatuur t.o.v. $11,5^{\circ}\text{C}$ (base case) resulteert in een afname van 12m of toename van 15m boordiepte. Bij een hogere initiële bodemtemperatuur duurt het langer totdat de ondergrond te veel is afgekoeld (vloeistoftemperatuur $<0^{\circ}\text{C}$), en is er dus minder boordiepte benodigd.



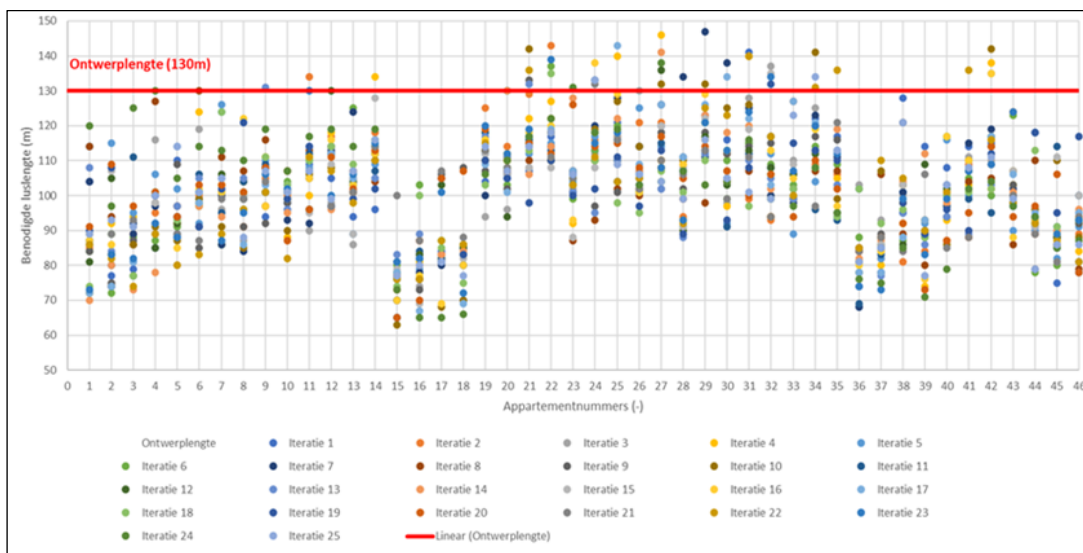
Figuur 7-1 . Benodigde boordiepte van collectief (4x12 geometrie met 7.5m tussenafstand) GBES doorerekend met EED voor variërende warmtegeleidingscoëfficiënten (λ), energievraagpatronen (E) en bodemtemperaturen (Tondergrond).

Bij een geclusterd ontwerp maakt het voor ieder individueel GBES uit op welke locatie deze zich bevindt t.o.v. de andere BWW's. Voor de base case is de gemiddelde boordiepte 112m (figuur 7-1), gelijk aan de collectieve berekening (zie figuur 7-1). Echter varieert de benodigde boordiepte tussen de BWW's onderling tussen de 80 en 130m. Een kleinere boordiepte is nodig voor BWW's geplaatst aan de buitenkant (en dus weinig interactie met andere BWW's) van het cluster, grotere boordiepte voor BWW's in het centrum van het cluster. Met toenemende benodigde gemiddelde boordiepte (kleinere warmtegeleidingscoëfficiënt, grotere netto warmteonttrekking) neemt ook de variatie in benodigde boordiepte tussen de lussen toe. Bij het scenario met de grootste benodigde boormeters ($\lambda=2$, $E=\text{maximaal}$) met een gemiddeld benodigde boordiepte van 235m varieert de benodigde boordiepte tussen de verschillende BWW's meer dan 150m (tussen 130m en 295m).



Figuur 7-2 . Benodigde gemiddelde boordiepte over alle 46 individueel beschouwde GBES binnen iteratieve clusterberekening, voor variërende warmtegeleidingscoëfficiënten en energievraagpatronen. Rode trajecten geven de minimale en maximale boordieptes aan voor de individuele systemen per scenario (systemen aan buitenkant van cluster minder benodigde boordiepte, aan binnenkant grotere boordiepte).

In de praktijk varieert het energievraagpatroon sterk tussen individuele GBES (zie resultaten bijlage H). Omdat tijdens het ontwerp niet duidelijk is wat het energievraagpatroon voor een individueel systeem precies gaat zijn, brengt dit onzekerheid met zich mee qua benodigde boordiepte (figuur 7-1). Voor de base case is de gemeten spreiding aan energievraagpatroon (paragraaf 5.1.1, bijlage L) 25 maal willekeurig verdeeld over de 46 BWW's binnen het project in Hoogezand. Deze variatie in energievraag resulteert in een spreiding van 30 tot 50m tussen het meest gunstige scenario (individuele BWW heeft lage netto warmtevraag, en weinig effect van nabijgelegen BWW's) en het meest ongunstige scenario (individuele BWW heeft hoge warmtevraag, en veel effect van nabijgelegen BWW's).



Figuur 7-3 . Benodigde gemiddelde boordiepte voor alle 46 individueel beschouwde GBES binnen iteratieve clusterberekening met per positie variërende energievraagpatronen.

7.4 Bevindingen/boodschap

Op basis van de analyses wordt het volgende geconstateerd:

- De netto bodemzijdige energievraag is sterk bepalend voor de benodigde totale lengte van de bodemwarmtewisselaars van een GBES. Dit geldt zowel bij collectief ontworpen systemen als bij geclusterde individuele systemen.
- De grote gemeten variatie in energievraag tussen de individuele GBES introduceert een grote onzekerheid in de benodigde lengte van de bodemwarmtewisselaars in het cluster.
- Bij een grote energievraag van het individuele bodemenergiesysteem zelf is het effect van omliggende systemen op de benodigde lengte van de bodemwarmtewisselaar relatief kleiner dan bij een kleine netto energievraag.
- De positie van een individueel systeem binnen een cluster als geheel heeft een sterke invloed op de benodigde boordiepte. Een systeem in het midden van een cluster heeft meer boormeters nodig vergeleken met een systeem aan de rand. Voor de geometrie uit deze analyse resulteert dit bij een uniforme energievraagverdeling in 40 tot 50m gemiddeld verschil in boordiepte tussen de meest en minst gunstig gelegen BWW's.
- Voor collectieve systemen zijn variaties in de gebruikspatronen tussen individuele gebruikers vrijwel niet van invloed zolang de totaalvraag gelijk blijft. Een collectief systeem biedt daarom een grotere mate van zekerheid wat betreft het ontwerp ten opzichte van individuele systemen, waardoor minder boormeters nodig zullen zijn om de prestatie van het systeem te kunnen waarborgen.
- De thermische parameters van de bodem (ongestoorde bodemtemperatuur, warmtegeleidingscoëfficiënt bodem) hebben ook een significante invloed op de benodigde hoeveelheid boormeters. Dit geldt zowel voor collectieve systemen als voor individueel geclusterde systemen.

- De deviaties van de verticaal van de boortrajecten kunnen, voor situaties waar BWW's dicht op elkaar staan (< 10 meter afstand) tot een mogelijk grotere thermische interferentie leiden dan op basis van de coördinaten aan het oppervlak berekend. Voor collectieve systemen heeft dit geen effect, aangezien deze effecten gelijkmatig over alle bodemwarmtewisselaars verdeeld worden. Bij clusters van individuele systemen geldt dat het zeer onwaarschijnlijk is dat alle omringende bodemwarmtewisselaars naar één specifiek systeem toegericht zijn. Met andere woorden: alhoewel de afwijkingen van de verticaal een extra onzekerheid introduceren, zullen de effecten elkaar grotendeels opheffen en waarschijnlijk is het effect t.o.v. het effect van de andere variabelen verwaarloosbaar. Echter, de kans dat twee boortrajecten elkaar raken blijft wel altijd aanwezig, en de mogelijkheid daartoe zou zoveel mogelijk beperkt moeten worden door het meenemen van adequate tussenafstanden binnen een ontwerp, zoals voorgeschreven in het protocol.

In het algemeen laat deze analyse zien dat geclusterde individuele systemen extra onzekerheden met zich meebrengen t.o.v. collectieve GBES. Omwille van deze onzekerheid worden de lussen van een individueel geclusterd systeem ontworpen met een grotere boordiepte t.o.v. een collectief systeem. Deze onzekerheid wordt vooral veroorzaakt door het potentieel grote verschil in individuele energieverbruik van de verschillende GBES. Zeker als het individuele energiegebruik niet binnen een relatief kleine marge kan worden vastgesteld lijkt het de grote voorkeur te hebben om, in situaties waar BWW's dicht op elkaar geplaatst moeten worden, te kiezen voor een collectief systeem om het aantal benodigde boormeters te kunnen minimaliseren en de prestaties van de GBES te kunnen waarborgen. Indien grondwaterstroming geen belangrijke rol heeft bij warmtetransport op een specifieke locatie, zijn Earth Energy Designer en ITGBES geschikte tools om een ontwerp op te stellen voor zowel collectieve en individueel geclusterde GBES.

Referenties

- Al-Khoury, R., Bonnier, P.G., Brinkgreve, R.B., 2005, Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 63 (2005) 7, 988-1013.
- Al-Khoury, R., Bonnier, P.G., 2006, Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part II: Transient. *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 67 (2006) 5, 725-745.
- Blomberg, T., Claesson, J., Eskilson, P., Hellström, G. & Sanner, B. 2015. *Earth Energy Designer*, versie 3.2.
- Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., 1959 *Conduction of Heat in Solids*, second ed. Oxford University Press, New York.
- Diersch, H. J. G., 2013. *FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media*. Springer Science & Business Media.
- Eskilson, P., 1987, *Thermal analysis of heat extraction boreholes*, Ph.D. Thesis, University of Lund, Lund, Sweden.
- Groenholland 2011. *Methode voor het bepalen van interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen*. Rapport GHNL 011103, Ministerie I&M.
- Groenholland 2019. *ITGBES, interferentietool Gesloten Bodemenergiesystemen*. Rapport 180760.
- Kooi, H. 2008. *Spatial variability in subsurface warming over the last three decades; insight from repeated borehole temperature measurements in The Netherlands*. *Earth and Planetary Science Letters*, 270, p. 86-94.
- Kooi, H., Witte, H., Doornenbal, P.J., 2020. *Realisatie van een meetsite voor het monitoren van een gesloten bodemenergiesysteem; mijlpaal 1 van onderzoeksproject OPTIGBES*. OPTIGBES rapport 11205627-0000-BGS-0004.
- Meer met Bodemenergie, 2012. *Rapport 8 – Autonome opwarming, autonome ontwikkeling bodemtemperatuur*.
- Naber, N., Schepers, B., Schuurbijs, M, Rooijers, F. (2016). *Een klimaatneutrale warmtevoorziening voor de gebouwde omgeving – update 2016*. Delft, CE-Delft. **16.3128.68**.
- Novem, 2003. *Kwaliteitsrichtlijn verticale bodemwarmtewisselaars*. 2DEN-03.24.
- Revil, A. 2000. *Thermal conductivity of unconsolidated sediments with geophysical applications*, *Journal of Geophysical Research*, 105/B7 p. 16,749-16,768.
- SIKB 2014. *Protocol 11001, BRL 11000: Ontwerp, realisatie en beheer van het ondergrondse deel van Bodemenergiesystemen, versie 2.0*.
- SIKB, 2014: *Methode toetsen interferentie tussen kleine gesloten bodemenergiesystemen*. Bijlage 2 bij de BUM's en HUM's bodemenergiesystemen. Versie 2.3, 11-12-2014.

Witte, H.J.L. 2013. Error analysis of thermal response tests. *Applied Energy* 109: 202-3011.

Zeng, H.Y., Diao, N.R., Fang, Z.H., 2002, A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers, *Heat Transfer Asian Res.* 31 (7) (2002) 558-567.

Bijlagen

Bijlagen A t/m F zijn bijlagen die horen bij het deelrapport **Realisatie van een meetsite voor het monitoren van een gesloten bodemenergiesysteem** mijlpaal 1 van onderzoeksproject OPTIGBES

De bijlagen van het huidige rapport zijn:

- G. Beschrijving online publicatie monitoringsdata – D3.1a OPTIGBES
- H. Resultaten bovengrondse monitoring
- I. Resultaten monitoring DTS (ondergrondse temperatuur-evolutie)
- J. Toetsing rekenmodellen ontwerp GBES
- K. Toetsing rekenmethoden voor bepaling van interferentie
- L. Gevoeligheid ontwerpmethode voor variaties in uitgangspunten: implicaties voor ontwerppraktijk
- M. Verslag workshop implicaties OPTIGBES voor richtlijnen en protocollen - D4.2 & D5.2
- N. Overzicht van disseminatieactiviteiten OPTIGBES – D6.1

G Beschrijving online publicatie monitoringsdata

D3.1a OPTIGBES

G.1 Inleiding

De bovengrondse en ondergrondse monitoringsdata alsmede de verschillende rapportages en congres-bijdragen zijn te downloaden op de volgende webpagina:

<http://www.optigbes.nl/resultaten.html>

In de volgende paragrafen volgt een korte beschrijving van de beschikbare boven- en ondergrondse datasets. Een meta-dataset met gedetailleerde beschrijving van de gegeven is onderdeel van de dataset zelf.

G.2 Bovengrondse data

Drie appartementen zijn voorzien van een bovengronds monitoringsysteem. Door middel van een drietal energiemeters worden de energiestromen naar het afgiftesysteem (verwarming en koeling), tapwaterverbruik en energievraag (onttrekking en toevoer) naar het bodemcircuit gemeten. Ook wordt de verbruikte elektrische hulpenergie van de warmtepomp door twee kWh meters bijgehouden. Interne gegevens van de warmtepomp (totale verwarmingsvraag en tapwaterproductie) worden gelogd evenals buitentemperatuur via de OpenWeather API (Application Programming Interface).

Gegevens worden elke 60 seconden gelogd. De ruwe datasets behoeven enige bewerking (omzetten eenheden en schaal) en filtering (uitfilteren incidentele ontbrekende gegevens, filteren temperatuurgegevens wanneer circulatiepomp niet in bedrijf is).

Ruwe datasets die beschikbaar gesteld worden (logtijd 60 seconden) zijn de dag-bestande. Deze omvatten, voor afgifte, tapwater en bodemsysteem:

- Vermogen (kW)
- Cumulatief totaal toegevoerde energie (kWh)
- Cumulatief totaal onttrokken energie (kWh)
- Debiet (l/h)
- Aanvoer- en retourtemperatuur (oC)
- Cumulatief tapwaterproductie warmtepomp (kWh)
- Opgenomen vermogen elektriciteit circuit 1 (kW)
- Cumulatief totaal elektrische energie circuit 1 (kWh)
- Opgenomen vermogen elektriciteit circuit 2 (kW)
- Cumulatief totaal elektrische energie circuit 2 (kWh)

Bewerkte gegevenssets die publiek beschikbaar gesteld worden zijn gegevens op uur- dag en maandbasis.

De beschikbare gegevens zijn:

- Energie ruimteverwarming (kWh)
- Energie ruimtekoeling (kWh)
- Energie tapwaterverbruik (kWh)
- Energie tapwaterproductie (kWh)
- Energie warmte-onttrekking bodem (kWh)
- Energie warmte-injectie bodem (kWh)

- Verbruikte hulpenergie (kWh)
- Afgiftesysteem: Minimum, maximum en gemiddelde aanvoer- en retourtemperatuur
- Tapwater afgifte: Minimum, maximum en gemiddelde aanvoer- en retourtemperatuur
- Bodemsysteem: Minimum, maximum en gemiddelde aanvoer- en retourtemperatuur

G.3 Ondergrondse temperatuur data en scripts

Temperatuurdata

De ondergrondse temperatuur data is gekalibreerd en als zip bestand (22 GB) opgeslagen. De kalibratie van de data en een voorbeeld van het gebruik van de data en de scripts is beschreven in hoofdstuk 4 van het eindrapport. De data heeft een verticale resolutie van 25 cm. Er zijn verschillende tijdstappen aanwezig voor verschillende delen van de dataset. De data is opgeslagen in het pickle format, het format wat in te lezen is met de Python (www.python.org). De data zijn vervolgens opgeslagen in de structuur beschreven in Tabel 1 Overzicht van de data in zip file, met daarbij de foldernaam, de pickle files in de folder en de omschrijving

Tabel 1 Overzicht van de data in zip file, met daarbij de foldernaam, de pickle files in de folder en de omschrijving

Foldernaam	Pickle files	Omschrijving
Averaged	<i>O1b.pickle</i>	Omvat de gemiddelde temperatuur over het diepte interval 20 – 130 m -mv over de gehele monitoringperiode
	<i>O1c.pickle</i>	
	<i>O1d.pickle</i>	
	<i>O2.pickle</i>	
	<i>O4.pickle</i>	
	<i>O5.pickle</i>	
	<i>O6.pickle</i>	
	<i>O7.pickle</i>	
Downgoing	<i>BL1a Downgoing.pickle</i>	Omvat de temperatuur elke 25 cm voor de neergaande vezel van de bodemlussen als ook de observatiepunten.
	<i>BL1b Downgoing.pickle</i>	
	<i>BL2 Downgoing.pickle</i>	
	<i>BL3 Downgoing.pickle</i>	
	<i>O1B Downgoing.pickle</i>	
	<i>O1C Downgoing.pickle</i>	
	<i>O1D Downgoing.pickle</i>	
	<i>O2 Downgoing.pickle</i>	
	<i>O4 Downgoing.pickle</i>	
	<i>O5 Downgoing.pickle</i>	
	<i>O6 Downgoing.pickle</i>	
	<i>O7 Downgoing.pickle</i>	
Upgoing	<i>BL1a Upgoing.pickle</i>	Omvat de temperatuur elke 25 cm voor de opgaande vezel van de bodemlussen als ook de observatiepunten.
	<i>BL1b Upgoing.pickle</i>	
	<i>BL2 Upgoing.pickle</i>	
	<i>BL3 Upgoing.pickle</i>	

<i>O1B Upgoing.pickle</i>
<i>O1C Upgoing.pickle</i>
<i>O1D Upgoing.pickle</i>
<i>O2 Upgoing.pickle</i>
<i>O4 Upgoing.pickle</i>
<i>O5 Upgoing.pickle</i>
<i>O6 Upgoing.pickle</i>
<i>O7 Upgoing.pickle</i>
<i>O8 Upgoing.pickle</i>

G.4 Scripts

De scripts om de ondergronds temperatuur data te gebruiken zijn ook te downloaden op de volgende website <http://www.optigbes.nl/resultaten.html>. Deze zijn samengevat in de OPTIGBES_visualization_functions.py. Deze omvat basis help functies om de data te gebruiken (Tabel 2) en visualisatie scripts (Tabel 3) om de data te visualiseren. De scripts zelf bevatten basis input parameters en een voorbeeld van het gebruik van de functie.

Tabel 2 basis help functies om de data te gebruiken

Script / function name	Description
def load_pickle(pickle_path):	Loads a pickle file contained in the path pickle_path (needs to be the full path to the .pickle file)
def roundup(x,target):	Roundup up number x to the target precision.
def find_nearest(array, value):	Find the nearest element of the input array to the given input value.
def nearest_date(datetimes, datetime):	Find the nearest element of an input Pandas DateTimeIndex array to an input datetime. Input datetime must be in the format e.g. "2022-02-10 19:48:00"
def to_xarray(df):	Converts an input dataframe df to an xarray structure, with coordinates Date - Distance.

Tabel 3 visualisatie scripts en uitleg om de data te visualiseren

Script / function name	Description
def plot_wells(df, lower_temp,upper_temp,name,plot_path,s ave="no"):	Returns a heatmap plot of a given input dataframe which is a matrix of temperatures across depth and time.
def imshow_plot_wells(df,target,lower,upper):	Quick heatmap visualization of a dataframe. Note: This is a faster implementation of the plot_wells function, however keep in mind that the temperatures are interpolated.
def plot_temp_v_distance(df,dates):	Description: A line plot of temperature development across all distances for selected dates.
def plot_temp_v_time(df,distances):	Description: A line plot of temperature development across time for selected distances.

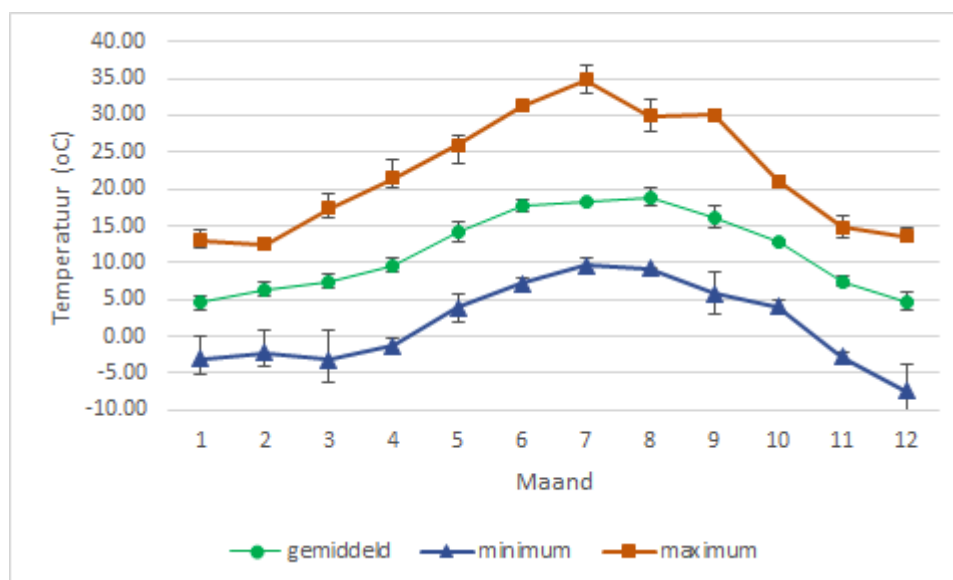
H Resultaten bovengrondse monitoring

Voor interpretatie van de energievraagpatronen zijn, naast bewonersgedrag, vooral buitenklimaat (temperatuur) en positie van het appartement in het gebouw belangrijke factoren. Van de drie appartementen is er één op de bovenste verdieping gesitueerd, één op de eerste en één op de tweede verdieping. Alle appartementen liggen aan de westkant van het gebouw.

In de beschouwde periode (2021 – 2024) zijn niet alle gegevens voor alle appartementen gemonitord. Deels is dit te wijten aan het vervangen van de internetverbinding door de gebruiker waarbij het monitoringsysteem niet correct opnieuw aangesloten was en deels door uitvallen van energie/debietmeters. Door de wijze van inbouw (achter de warmtepomp) was dit ook niet in alle gevallen te herstellen. Waar mogelijk zijn ontbrekende gegevens aangevuld (bijvoorbeeld door gegevens uitgelezen uit de warmtepomp).

H.1 Buitentemperatuur

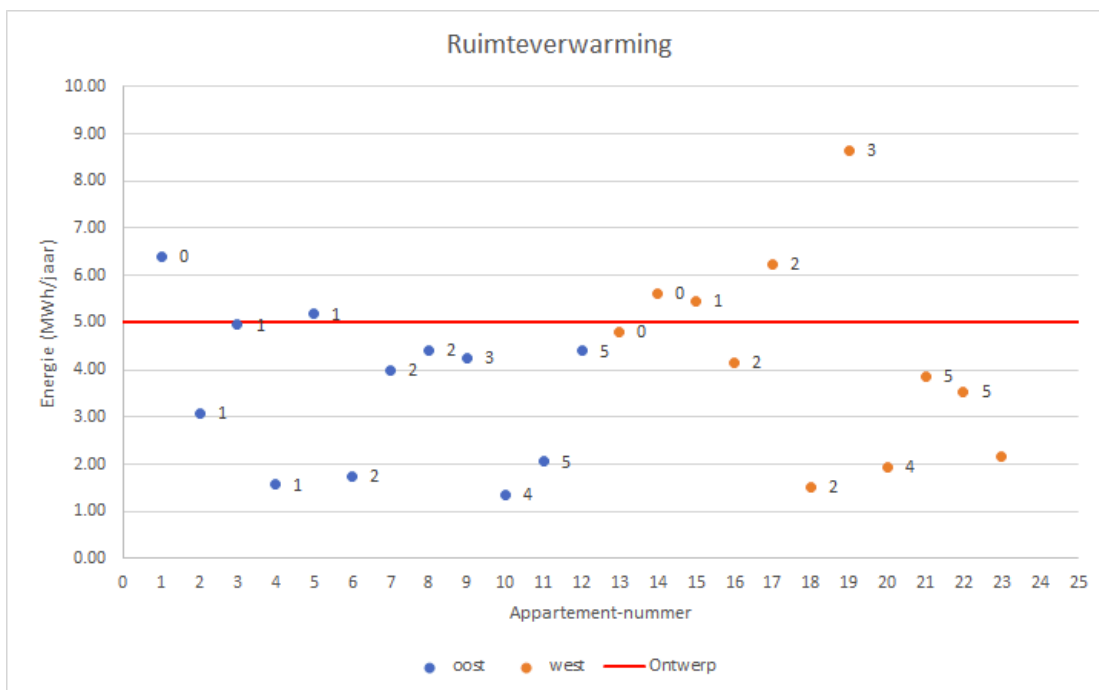
Gegevens over buitentemperatuur (Figuur H-1) zijn verzameld vanaf November 2021, weergegeven zijn de gemiddelde, de minimum en maximum buitentemperatuur en de spreiding voor elke serie (de serie bestaat uit twee volledige jaren en enkele maanden van 2021 en 2024). Er is niet veel spreiding in de gemiddelde maandelijkse temperatuur, deze varieert tussen 4,7 °C in de winter en 19,0 °C in de zomer, met een spreiding kleiner dan 0,1K (juli) tot 1,5K (september). Maximum temperatuur varieert tussen de 13,0 °C (winter) en 34,8 °C (zomer) met een spreiding tussen de 0,7K (februari) en 2,2K (augustus). De minimum temperatuur is gemiddeld -7,45 °C (december) en 9,7 °C (juli), spreiding bedraagt 0,7K (juni) tot 3,2K (december). De geregistreeerde minimum temperatuur is zowel in december 2021 (-6,73 °C) als december 2022 (-10,99 °C) laag.



Figuur H-1 Buitentemperatuur: gemiddelde, minimum en maximum buitentemperatuur gedurende de periode september 2021 tot en met mei 2024

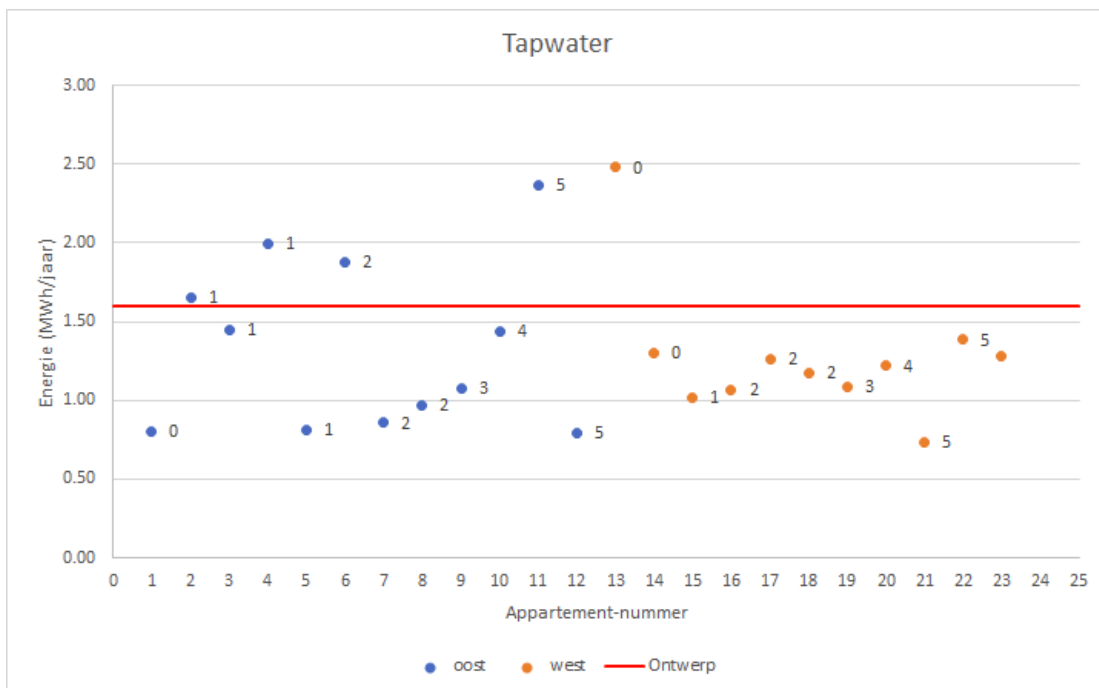
H.2 Overzicht totaal verwarmings- en tapwatervraag appartementencomplex

De warmtepompen van de meeste appartementen zijn aangesloten op de "data-cloud" van Alpha-InnoTec. Daar wordt totale warmte- en tapwaterlevering bijgehouden. Deze zijn voor het project enkele malen handmatig uitgelezen en omgerekend naar jaarlijkse totalen voor ruimteverwarming en tapwater (ruimtekoeling wordt niet in de Alpha-InnoTec data-cloud geregistreerd). Uit Figuur H-2 is te zien dat de meeste appartementen in vergelijking met de ontwerp-waarde een kleinere energievraag hebben, maar sommige appartementen hebben ook een grotere energievraag. Er is sprake van een grote bandbreedte: de kleinste energievraag bedraagt 1,4 MWh/jaar en de hoogste 8,7 MWh/jaar. Er is geen duidelijk verband tussen energievraag en expositie (oost of west) of tussen energievraag en verdieping.



Figuur H-2 Overzicht totale energievraag ruimteverwarming (MWh/jaar) geregistreerd over de monitoringperiode in de Alpha-InnoTec data-cloud. Expositie (oost of west) en verdieping (nummer) alsmede ontwerp-waarde (rode lijn) zijn weergegeven.

Uit Figuur H-3 is te zien dat de meeste appartementen in vergelijking met de ontwerp-waarde een kleinere energievraag hebben, maar sommige appartementen hebben ook een grotere energievraag. Er is sprake van een grote bandbreedte: de kleinste energievraag bedraagt 0,7 MWh/jaar en de hoogste 2,5 MWh/jaar. Er is geen duidelijk verband tussen energievraag en expositie (oost of west) of tussen energievraag en verdieping.



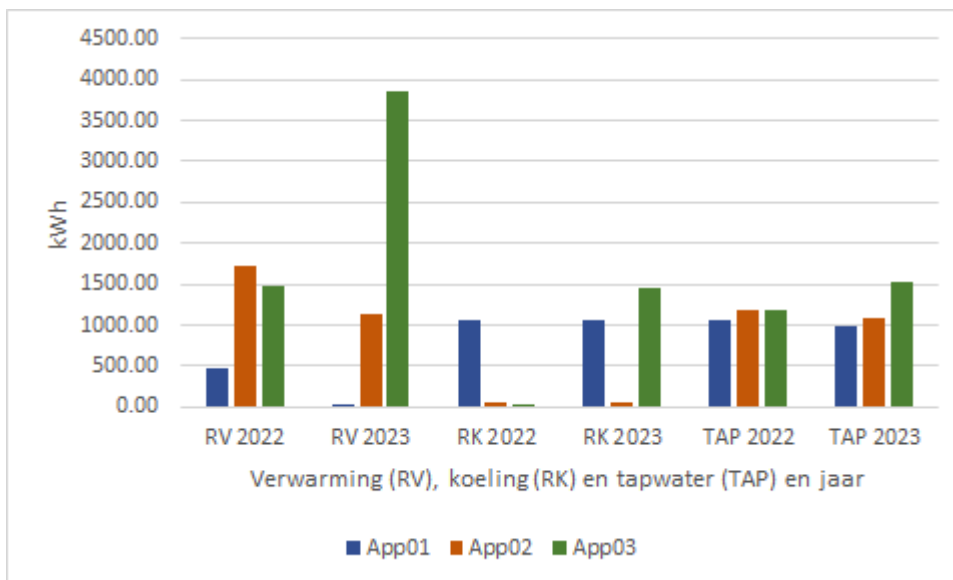
Figuur H-3 Overzicht totale energievraag ruimteverwarming (MWh/jaar) geregistreerd over de monitoringperiode in de Alpha-InnoTec data-cloud. Expositie (oost of west) en verdieping (nummer) alsmede ontwerp-waarde (rode lijn) zijn weergegeven.

H.3 Energievraagpatronen en SPF gemonitorde appartementen

De energievraagpatronen worden hier samengevat op maandbasis. Omdat op niveau van maand geen onderscheid te maken is in verbruikte elektriciteit voor verwarming, tapwater en koeling wordt een overall SPF gepresenteerd. Interessant is met name het verschil tussen de appartementen en verschillen tussen de maanden over de jaren (september 2021 – mei 2024) waarover gegevens beschikbaar zijn. De monitorperiode beslaat twee volledige jaren (2022 en 2023), het totaal over de hele monitoringperiode (september 2021 tot en met mei 2024), de totalen voor deze jaren voor de drie appartementen wordt in Tabel 4 gegeven, Figuur H-4 geeft een grafische presentatie van de gegevens voor 2022 en 2023. Zowel tussen de appartementen als tussen de jaren is er een aanzienlijk verschil in energievraag voor ruimteverwarming en koeling. Appartement #3 heeft in 2022 nog nagenoeg geen koeling terwijl in 2023 het aandeel koeling aanzienlijk is. In 2023 is de spreiding in verwarmingsvraag ook groot, Appartement #3 heeft ook hier een veel hogere waarde dan de andere appartementen of jaren. Tapwatervraag daarentegen is veel constanter.

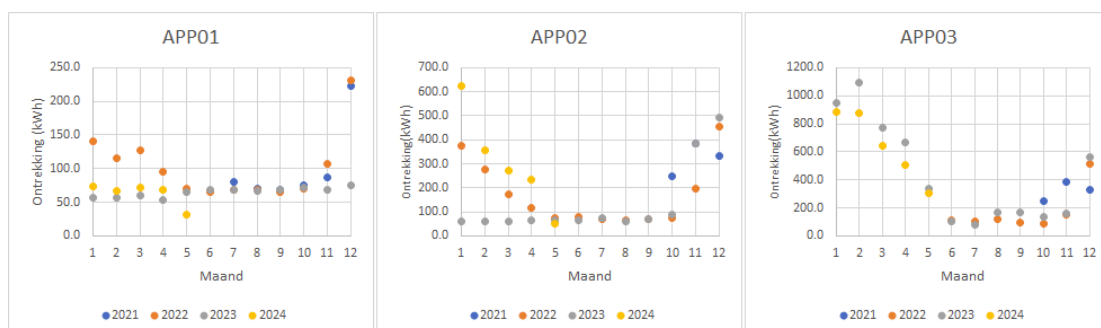
Tabel 4 Totale vraag ruimteverwarming, tapwater en ruimtokoeling drie appartementen periode 2021 – 2024.

Appartement	Jaar	Ruimteverwarming kWh	Tapwater kWh	Ruimtokoeling kWh
01	2021-2024	682,00	2865,9	2611,4
01	2022	481,70	1071,7	1064,2
01	2023	3,80	986,0	1053,3
02	2021-2024	5430,3	3137,4	604,2
02	2022	1733,6	1192,5	66,1
02	2023	1145,8	1073,4	66,4
03	2021-2024	7786,9	3173,7	2071,9
03	2022	1478,4	1180,1	36,1
03	2023	3849,9	1528,0	1456,4



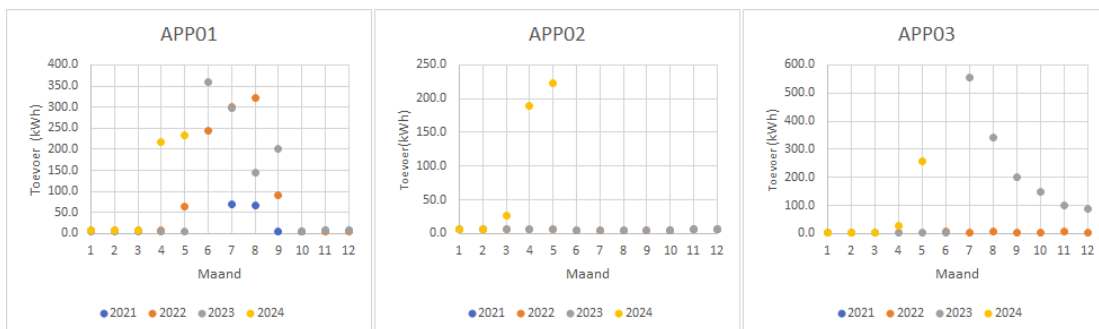
Figuur H-4 Totale vraag ruimteverwarming, tapwater en ruimtekoeling drie appartementen periode 2022 – 2023.

Naast de energietotalen zijn voor het ontwerp van een gesloten bodemenergiesysteem ook de verdeling over de maanden van belang. Figuur H-5 geeft de bodemzijdige warmteonttrekking (ruimteverwarming en tapwaterbereiding) en warmte-injectie (koeling) weer voor de drie appartementen. Voor de monitoringperiode die loopt van juni 2021 tot mei 2024 is te zien dat voor Appartement 01, met een lage totale verwarmingsvraag, de verdeling over het jaar relatief constant is (alleen december significant hoger, januari t/m maart iets hoger). Hier is de totale verwarmingsvraag met name door tapwater bepaald. Voor appartement 2 en 3 is er een duidelijkere verdeling over de maanden, maximale energievraag in januari, februari en maart en ook hogere vraag in oktober t/m december.-



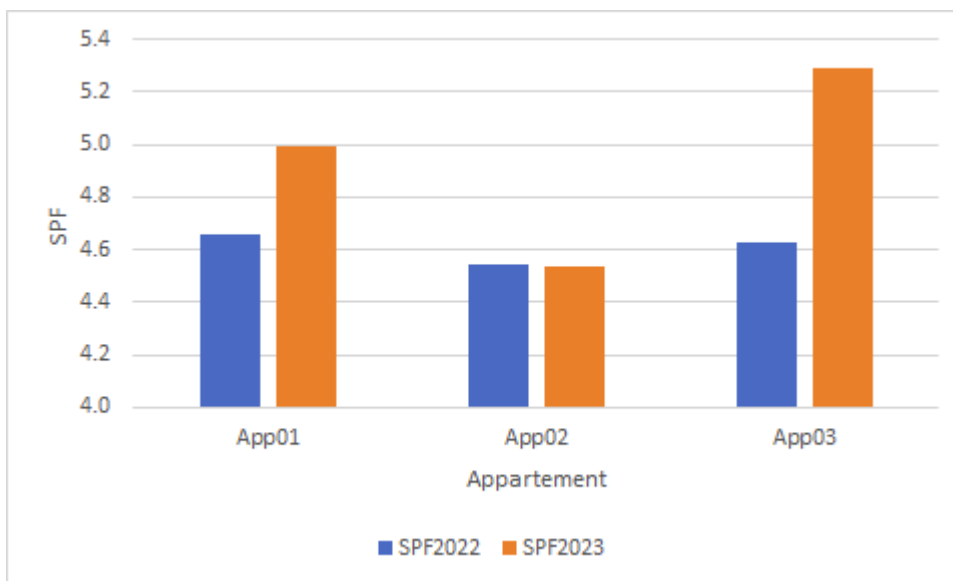
Figuur H-5 Maandverdeling warmte-onttrekking bodemwarmtewisselaars.

De koelvraag is in het algemeen veel kleiner dan de verwarmingsvraag. De maandverdeling (zie Figuur H-6) laat zien dat de koeling vrij willekeurig verdeeld is over de maanden april t/m september. In Appartement 3 is de koeling alleen in 2023 en 2024 actief, hier valt op dat ook in oktober t/m december er nog koelvraag geweest is.



Figuur H-6 Maandverdeling warmte-toevoer bodemwarmtewisselaars.

Rendement voor 2022 en 2023 (totaal rendement van ruimteverwarming, tapwater en koeling; hulpenergie totaal compressorenergie en circulatiepompenergie) is in Figuur H-7 gegeven. Op basis van de ontwerpgegevens zou de systeem SPF 4,1 zijn. De gemeten SPF is significant hoger (tussen de 4,5 en 5,3),

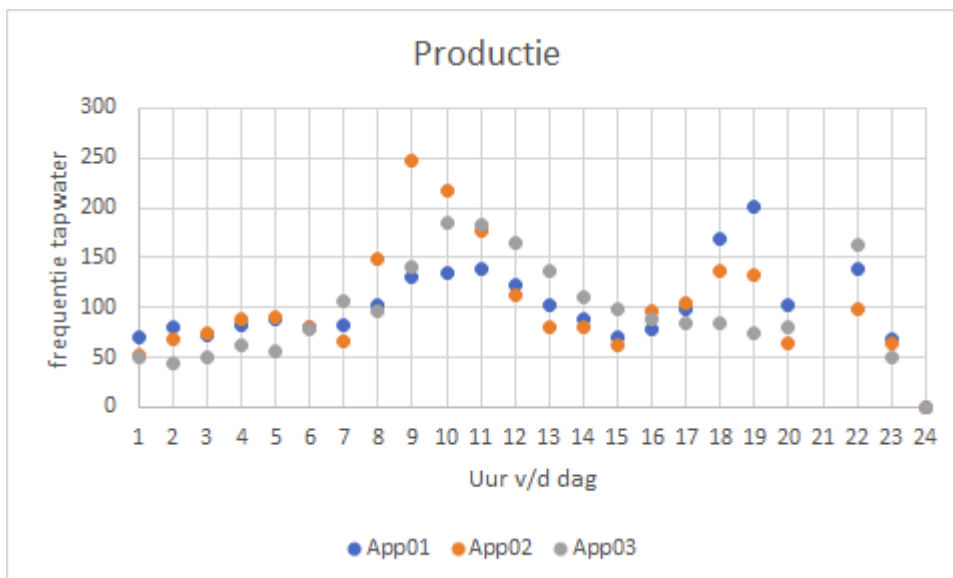


Figuur H-7 Systeem SPF appartementen 2022 – 2023.

H.3.1 Tapprofielen

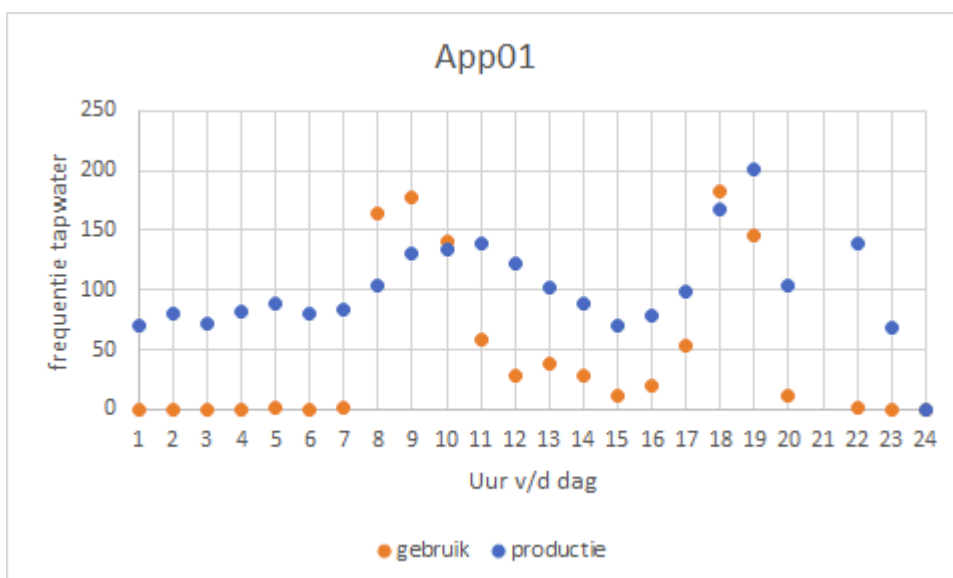
Naast de energievraagpatronen zijn tapwaterprofielen samengesteld. De tapwaterprofielen geven aan op welke uren van de dag er daadwerkelijk tapwatervraag is en op welke uren van de dag tapwater door de warmtepomp geproduceerd wordt. Het debietdeel van de energiemeter voor appartement 1 en appartement 3 zijn verkeerd gemonteerd waardoor geen debietmeting mogelijk was, dit was ook niet te verhelpen door de positie van de meters (tussen de achterzijde warmtepomp en muur). Voor deze appartementen is daarom alleen de productie bekend, de afname is voor appartement 2 bepaald.

Wat allereerst opvalt is dat de tapwaterproductie door de warmtepomp hoger is dan de werkelijke afname, bijna met een factor 2. Dit zou te wijten kunnen zijn aan standverliezen en legionellapreventie. Tapwaterproductieprofielen (Figuur H-8) komen voor alle drie de appartementen goed overeen, met name tussen 8 – 12 uur en 18:00 – 22:00 uur is er tapwaterbereiding.



Figuur H-8 Frequentieverdeling tapwaterbereiding uur van de dag.

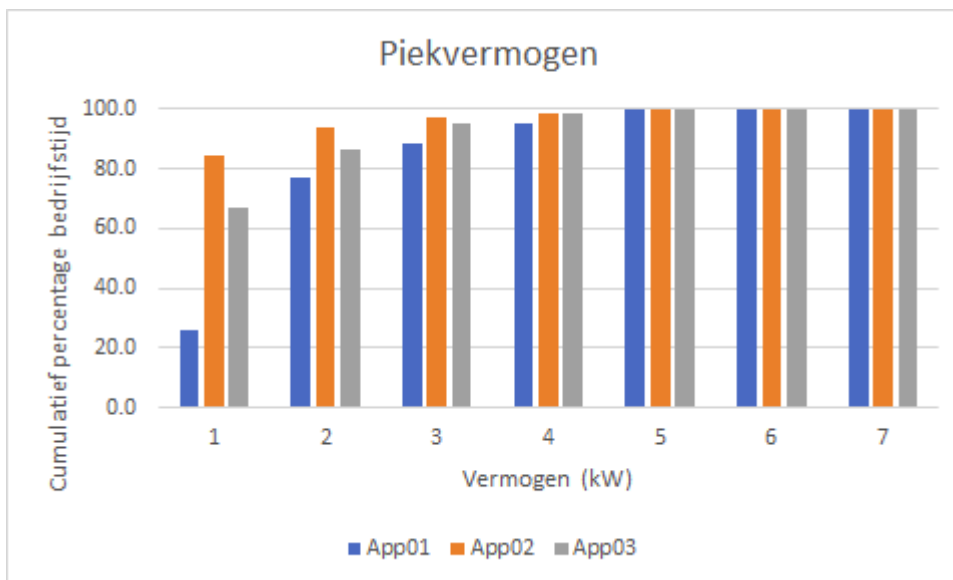
Appartement 1 geeft ook tapwatergebruik weer, alhoewel lager dan tapwaterbereiding is het gebruik en productieprofiel nagenoeg gelijk (zie figuur H-9) .



Figuur H-9 Frequentieverdeling tapwaterbereiding en tapwatergebruik uur van de dag, Appartement 1.

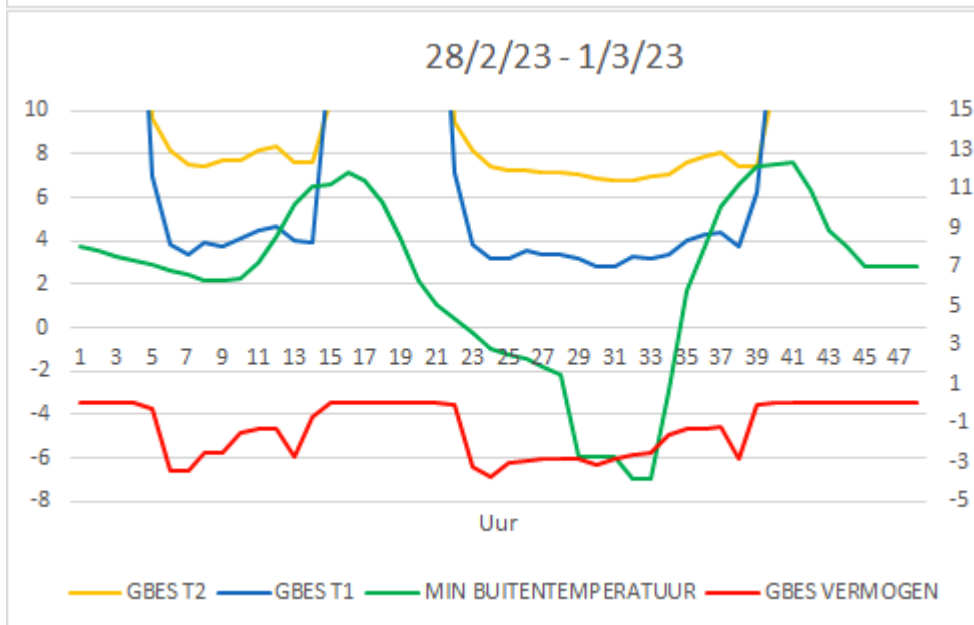
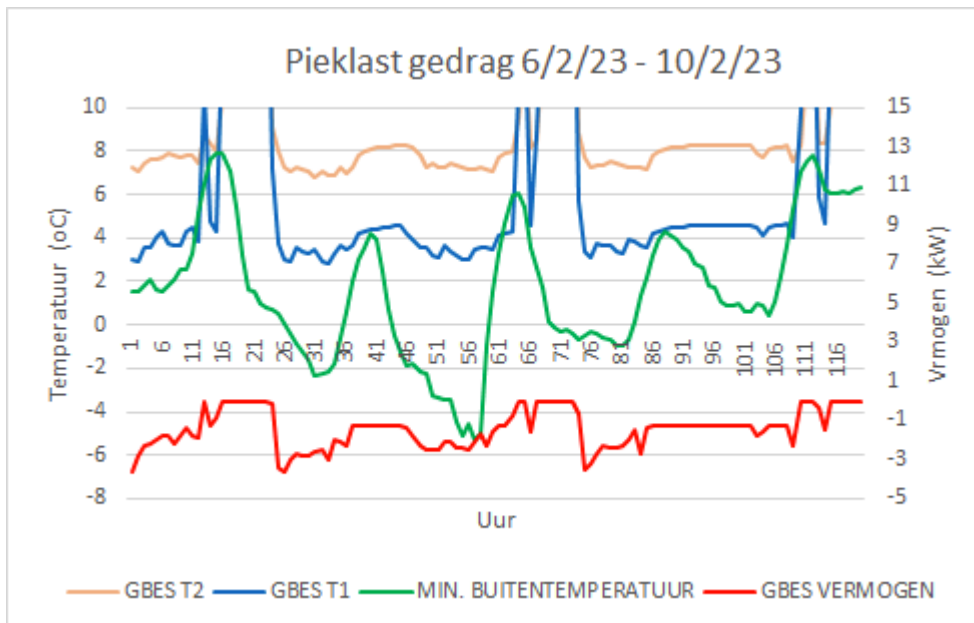
H.3.2 Pieklast

Pieklast, maximale vermogen en duur van vermogensvraag, zijn naast energievraag voor een groot deel bepalend in het ontwerp. De verdeling van de pieklast (vermogen over een uur, als cumulatief percentage van totale tijd met vermogen groter dan 0 kW) is in Figuur H-10 gegeven. Duidelijk blijkt dat de overgrote deel van de tijd het vermogen kleiner is dan 2 kW en meer dan 95% van alle energievraag niet groter is dan 4kW.



Figuur H-10 Cumulatieve frequentieverdeling vermogen (pieklust) ruimteverwarming.

Om inzicht te krijgen in de maximale pieklustduur is voor een tweetal koude periodes (6/2/23 t/m 10/2/23 en 28/2/23 t/m 1/3/23, buitentemperatuur minimum ± -6 °C). Figuur H-11 geeft de buitentemperatuur, vermogen (bodenzijdig) en minimum (GBES T1) en maximum (GBES T2) vloeistoftemperatuur van het bodemwarmtewisselaarsysteem weer. Wat opvalt is allereerst dat de vermogensvraag wel gekoppeld is aan de buitentemperatuur maar snel afneemt, van net boven de 6 kW (warmteonttrekking bodem) tot net minder dan 4 kW. Bij 4 kW warmteonttrekking aan de bodem levert de warmtepomp gebouwszijdig $\pm 5 - 6$ kW. Pieklustduur in deze twee series is 37 en 34 uur (periode 6/2 t/m 10/2_ 2023) en 8 en 15 uur (periode 28/2 t/m 1/3 20-23), alhoewel er sprake is van een redelijk lange pieklustduur is ook duidelijk dat de temperatuur in het bodemwarmtewisselaarsysteem nagenoeg constant blijft (de eerste daling is de afkoeling van de vloeistof die, als de bronpomp niet in bedrijf is, de ruimtetemperatuur aanneemt).

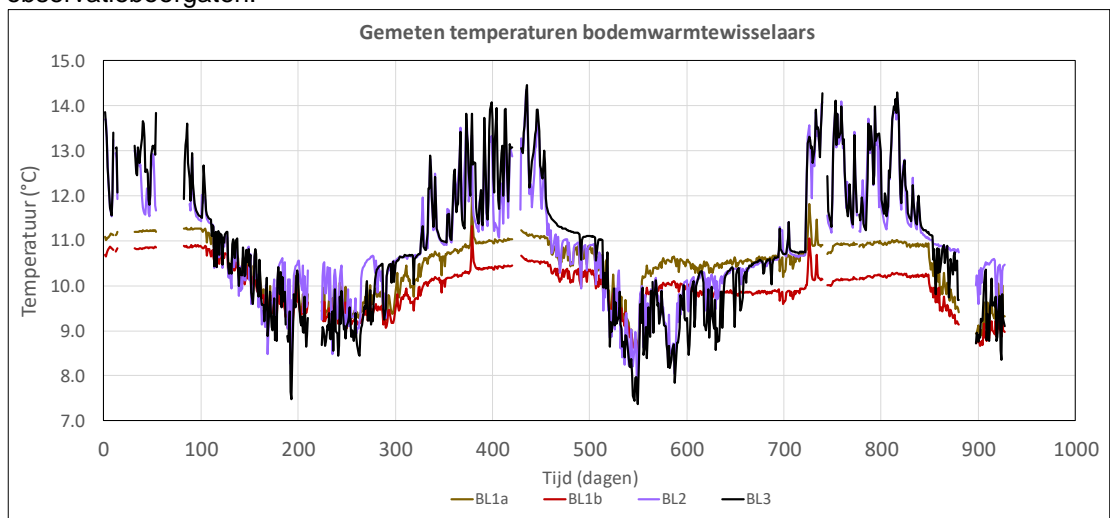


Figuur H-11 Pieklast gedurende geselecteerde koude periodes..

I Resultaten monitoring DTS (ondergrondse temperatuur-evolutie)

In deze bijlage zijn figuren opgenomen die resultaten tonen van de DTS monitoring die zijn gebruikt voor de toetsing van de rekenmethoden voor interferentie in Hoofdstuk 6 (en bijlage K). In paragraaf 4.2.3 zijn andere visualisaties opgenomen die een breder beeld geven van de monitoringsdata, bijvoorbeeld van momentopnamen van temperatuur langs een bodemlus en van tijd-diepte informatie.

Figuur I-1 en Figuur I-2 geven de met de glasvezelkabels gemeten temperaturen (DTS) over de gehele monitoringsperiode voor respectievelijk de bodemwarmtewisselaars en de observatieboorgaten.



Figuur I-1 Met glasvezelkabel gemeten temperaturen in gemonitorde bodemwarmtewisselaars, over de gehele monitoringsperiode.

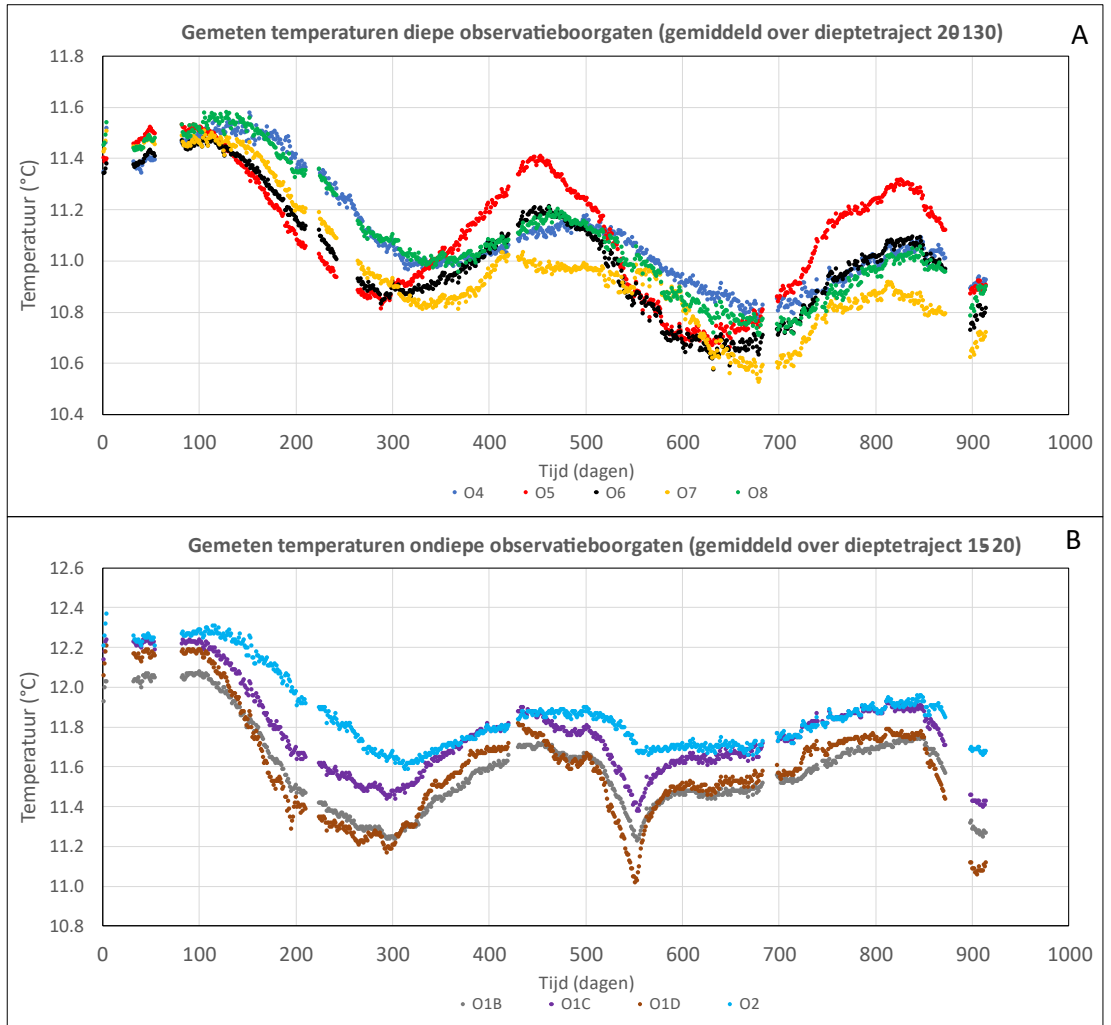
In Figuur I-1 is een duidelijk verschil te zien in het gedrag van de verschillende wisselaars. BL2 en BL3 lijken zowel tijdens de wintermaanden als zomermaanden actief, en hebben allebei een maximale temperatuuramplitude van ca. 3 K tijdens de piekmomenten. Omdat BL1a en BL1b samen aangesloten zitten op één appartement is het logisch dat deze twee bodewarmtewisselaars een gelijk temperatuurverloop laten zien. Vergeleken met de andere twee bodewarmtewisselaar laten ze echter wel een veel minder grote variatie zien in temperaturen. Met name tijdens de zomermaanden (ca. dagen 0 – 100, 350 – 500, 700 – 850) is de temperatuur vrijwel constant. Opmerkelijk is ook dat er over de gehele meetperiode een bijna constant verschil tussen de gemeten temperaturen in BL1a en BL1b aanwezig is.

De in a weergegeven temperaturen zijn de gemiddelden over het traject 20 – 130 m -mv zoals geregistreerd in de observatieboorgaten. Dit traject is zo gekozen om de invloed van natuurlijke seizoensmatige fluctuaties in bodemtemperatuur in de ondiepe ondergrond zo veel mogelijk buiten de analyse van de resultaten te houden. Zoals te zien, is er in alle observatieboorgaten alsnog een seizoensmatig patroon aanwezig. Dit kan echter worden toegeschreven aan de activiteit van de nabijgelegen bodewarmtewisselaars. Figuur I-3 geeft een vergelijking tussen de gemiddelde temperatuur op het traject 20 – 130 m -mv van bodewarmtewisselaar BL3 en nabijgelegen observatieboorgat O5 (voor de ruimtelijke indeling van deze twee boorgaten zie Figuur 3.2). Zoals te verwachten, is er sprake van een duidelijke relatie wat betreft de

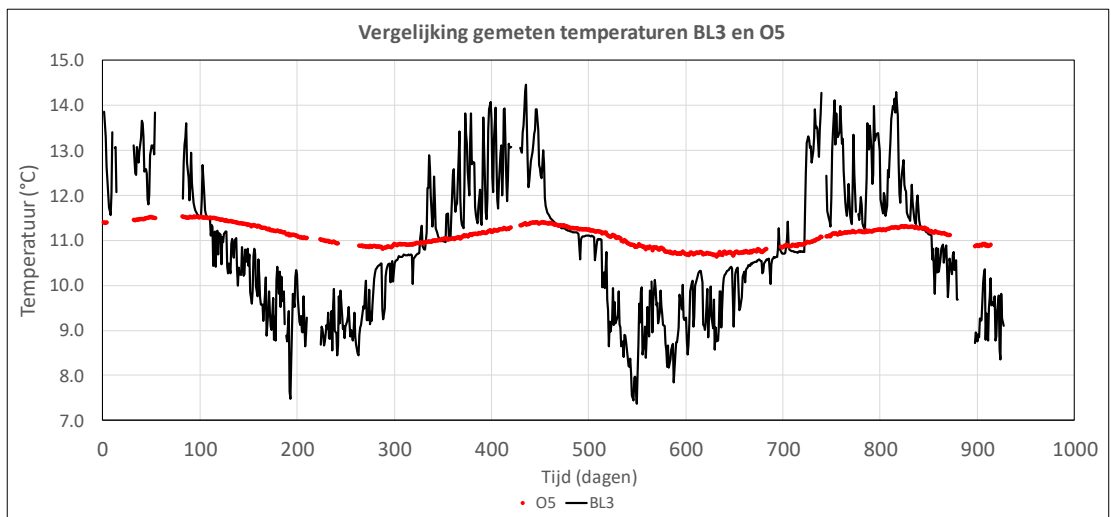
temperatuurstijgingen en dalingen die worden geregistreerd in het observatieboorgat ten op zichte van de originele energiepuls vanuit de bodemwarmtewisselaar. Hierbij is het effect wel significant gedempt (minder groot ter hoogte van observatiepunt) en er is een kleine vertraging aanwezig, welke verklaard kan worden door de afstand tussen de bodemwarmtewisselaar en het observatieboorgat. Ondanks de fluctuaties in temperatuur, kan op basis van Figuur I-2a over de gehele meetperiode voor alle observatieboorgaten geconcludeerd worden dat er sprake is van een netto afkoeling. Deze bedraagt maximaal ca. 0,6 K (O7) en minimaal ca. 0,2 K (O5).

Figuur I-2 b geeft de ontwikkeling van de temperaturen in de ondiepe boorgaten die op korte afstand (1 á 2 m) van bodemwarmtewisselaar BL1a geplaatst zijn. De weergegeven temperaturen zijn de gemiddelden voor het traject 15 – 20 m -mv. Ook hier is dit traject gekozen om de invloed van natuurlijke seizoenen en fluctuaties in bodemtemperatuur in de ondiepe ondergrond zo veel mogelijk buiten de analyse van de resultaten te houden. Ondanks de korte afstand van de observatieboorgaten tot de bodemwarmtewisselaar, is er geen hele sterke seizoensmatige invloed van de energievragen vanuit bodemwarmtewisselaar zichtbaar gedurende de gehele meetperiode. Met name in de periode tussen ca. dag 550 en 850 loopt de temperatuur in alle observatieboorgaten relatief lineair langzaam op.

Opmerkelijk is wel het verschil in temperatuur tussen de 4 observatieboorgaten. Observatieboorgaten O1B, O1C als O1D liggen ruimtelijk allemaal relatief dichtbij elkaar, en zijn alle drie ca. 1 m af van bodemwarmtewisselaar BL1a gepositioneerd (voor de ruimtelijke indeling van deze boorgaten zie Figuur 3-2). Tussen O1C en O1B zit vrijwel de gehele meetperiode een verschil in gemeten temperatuur van ca. 0,2 K. O1D registreert qua bereik vergelijkbare temperaturen als de andere twee observatieboorgaten, maar regeert wel 'heftiger' (grotere amplitude) op de activiteit van de bodemwarmtewisselaar dan de andere twee observatieboorgaten. O2 is wat verder weggelegen dan de andere observatieboorgaten en wordt over de gehele meetperiode het minst beïnvloed door de activiteit van BL1a.



Figuur I-2 Met glasvezelkabel gemeten temperaturen in gemonitorde observatieboorgaten over de gehele monitoringsperiode.



Figuur I-3. Vergelijking temperatuurontwikkeling bodemwarmtewisselaar BL3 en nabijgelegen observatieboorgat O5 over de gehele monitoringsperiode.

J Toetsing rekenmodellen ontwerp GBES

Het ontwerpen van gesloten bodemenergiesystemen gebeurt in de praktijk in Nederland voornamelijk met behulp van het 'standaard softwarepakket' Earth Energy Designer (EED). Dit programma biedt een relatief eenvoudige interface voor de gebruiker, en kent bovendien praktisch geen wachttijd bij het uitvoeren van berekeningen. Om dit te bereiken zijn een aantal vereenvoudigingen doorgevoerd in de toegepaste rekenmethode. Voor een compleet overzicht hiervan zie Blomberg et al. 2019. De belangrijkste worden hieronder opgesomd:

- Er wordt gerekend met één uniforme bodemtemperatuur over de gehele diepte van de wisselaar.
- Er wordt gerekend met één uniforme vloeistoftemperatuur over het gehele van de bodemwarmtewisselaar.
- Warmtetransport tussen de wisselaar en de bodem gebeurt enkel als gevolg van temperatuurverschil tussen vloeistof en bodem.
- Warmtetransport in de bodem treedt enkel horizontaal (geen axiaal transport) op en is uniform verspreid over de lengte van de bodemwarmtewisselaar.
- Het effect van de warmtecapaciteit van de vloeistof in de bodemwarmtewisselaar wordt niet meegenomen.
- Temperatuurverandering als gevolg van maandelijks energievraag voor een lange periode (30 – 50 jaar) en temperatuurverandering als gevolg van vermogensvraag gedurende een vastgesteld aantal uren is ontkoppeld (berekening basis- en pieklast).

De combinatie van deze twee ontkoppelde temperatuurontwikkelingen bij de gekozen invoerparameters wordt door het programma vertaald naar de benodigde hoeveelheid boormeters om aan het einde van de simulatie nog een bepaalde minimale (of, bij koeling, maximale) vloeistoftemperatuur te realiseren, nodig om een bepaald gekozen rendement te garanderen.

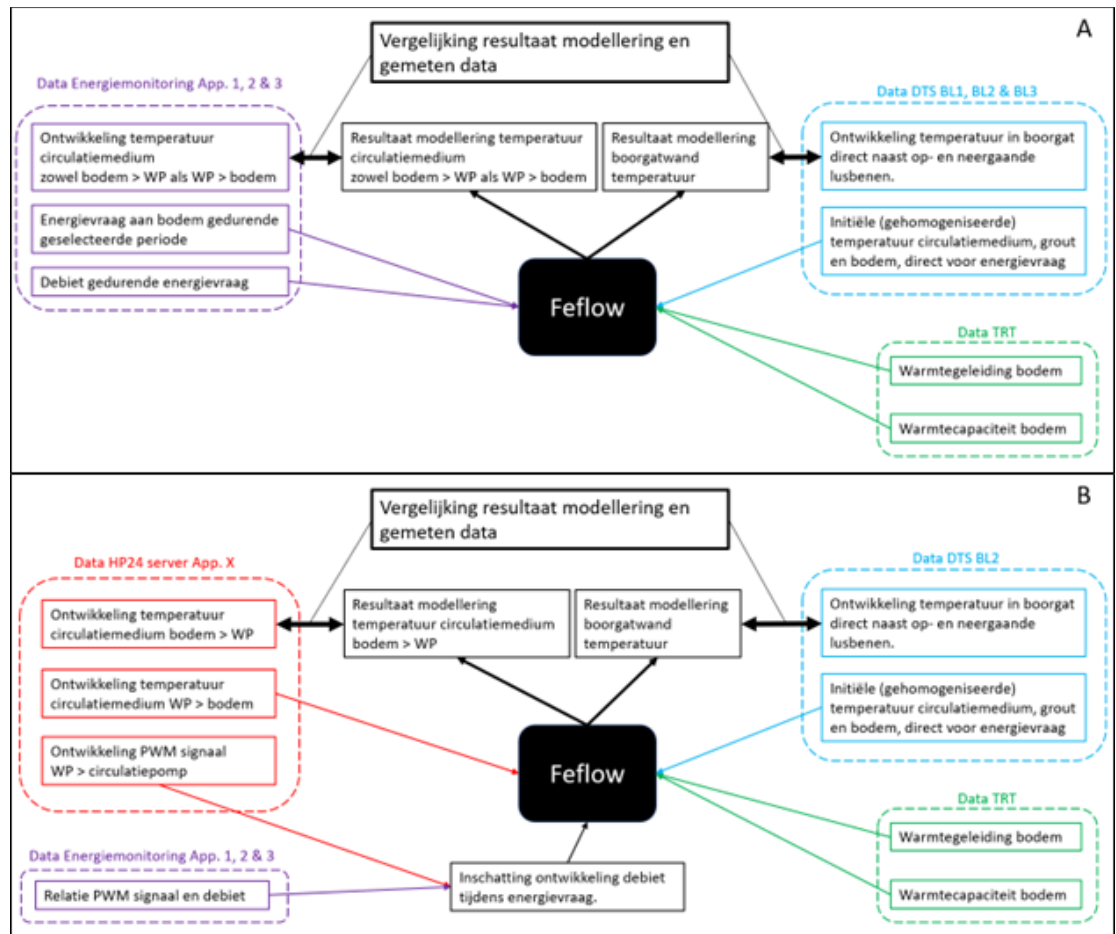
Met name de invloed van de specificaties van de pieklast, kan binnen een EED-berekening een grote invloed uitoefenen op de berekende boormeters. Een van de belangrijkste doelen van het huidige project is daarom om te toetsen in hoeverre de met de 'standaardsoftware' berekende temperatuurresponsen op pieklasten overeenkomen met wat er in de praktijk wordt waargenomen.

Naast het toetsen van de modelprincipes gehanteerd binnen EED, wordt binnen deze analyse ook gekeken naar de invloed van de thermische parameters van de bodem op de ontwikkeling van de vloeistoftemperatuur tijdens pieklasten. Zoals eerder gepresenteerd in Tabel? Is er een significant verschil tussen de thermische parameters geschat bij oorspronkelijke ontwerp en de op locatie met TRT's gemeten waarden.

J.1 Aanpak modellering energie(piek)lasten in bodemwarmtewisselaars

Voor een analyse van de ontwikkeling van de temperaturen in de bodemwarmtewisselaars bij pieklasten, is een combinatie nodig van monitoringsdata uit zowel het ondergrondse als het bovengrondse gedeelte van de GBES. De initieel bedachte opzet hiervoor is weergegeven in het blokschema in Figuur J-1. Zoals eerder vermeld, was echter slechts één combinatie van boorgat (DTS-metingen) en warmtepomp bekend, welke hiervoor gebruikt kon worden. Dit betrof bodemwarmtewisselaar 'BL2' en appartement 'X'. Van appartement 'X' was daarnaast geen energievraagdata bekend, maar via de 'HP24 server' konden wel de aanvoer- en retourtemperaturen geregistreerd door de warmtepomp uitgelezen worden. Uiteindelijk wordt

daarom een procedure zoals weergegeven in het blokschema van Figuur J1-b gevolgd. In onderstaande paragraaf wordt deze nader toegelicht.



Figuur J-1 Blok schematisatie initieel bedachte (A) en uiteindelijk toegepaste (B) procedure met betrekking tot opzet modellering energie(piek)vragen in bodemwarmtewisselaars.

J.1.1 Opzet Feflow model

Om een temperatuurrepons in een boorgat op een energievraag na te bootsen, wordt gebruikt gemaakt van 'Feflow' (Diersch, 2013). Dit is een geavanceerd modelprogramma voor het simuleren van grondwaterstroming, massatransport en warmtetransport in poreuze media in drie dimensies, waarin tevens gebruik gemaakt kan worden van een gedetailleerde bodemwarmtewisselaar module. Voor deze analyse wordt een model opgezet met dimensies 50x50x160m (lxbxh) waarbij een enkele bodemwarmtewisselaar tot 130 m -mv in het midden wordt geplaatst. De opbouw van het modelnetwerk ("knooppunten") in de directe nabijheid van de wisselaar worden hierbij expliciet gekozen om een correcte overdracht van energie tussen de bodemwarmtewisselaar en het omringende bodemvolume te kunnen garanderen.

Als invoerdata bij de gevolgde aanpak is tenminste nodig een aanvoertemperatuur vanuit de warmtepomp naar de bodem, evenals het debiet over het broncircuit. Hiermee kan vervolgens de retourtemperatuur vanuit de bodem terug naar de warmtepomp worden gesimuleerd, en vergeleken met de temperatuur geregistreerd door de warmtepomp zelf. Het debiet wordt echter niet geregistreerd in de HP24 serverdata. Wel wordt een 'Pulse Width Modulation' (PWM) signaal geregistreerd, wat door de warmtepomp naar de circulatiepomp gestuurd wordt tijdens de energievragen. Middels de data van de separaat gemonitorde appartementen 1, 2 & 3 (waar de precieze debieten wel bekend zijn) wordt gepoogd een relatie op te stellen tussen PWM-waarden en het debiet, welke vervolgens gebruikt kan worden om de debieten in te schatten tijdens de energievragen uit appartement X.

Naast het vergelijken van de retourtemperatuur vanuit de bodem richting de warmtepomp tussen model en werkelijkheid, wordt er ook gekeken naar de verhouding tussen de boorgatwandtemperatuur (gemiddeld over lengte boorgat) berekend door het model, en de door de DTS gemeten temperaturen in het boorgat (gemiddeld over op en neergaande benen over lengte boorgat).

J.1.2 Selectie energie(piek)vragen uit HP24 en DTS data

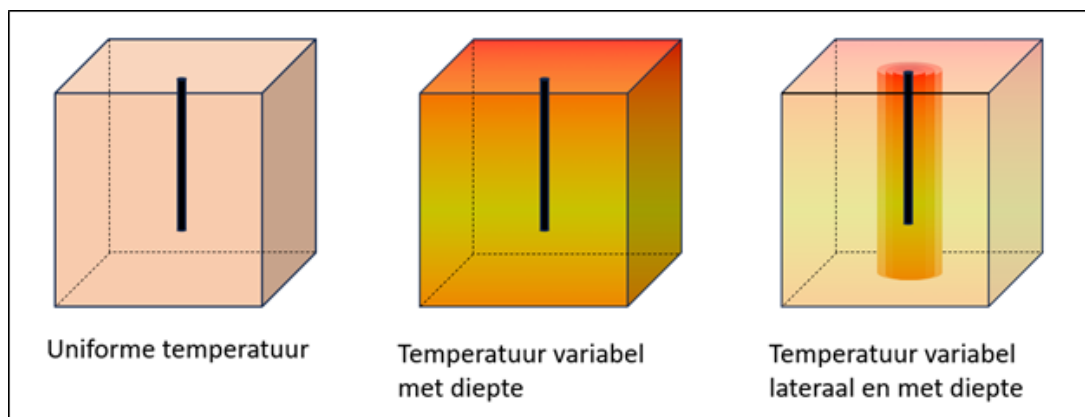
De volledige 2,5 jaar omvattende datasets worden geanalyseerd om te kijken op welke momenten pieklasten vanuit appartement X de meest duidelijke respons genereren. Hiervoor wordt binnen de HP24 serverdata gefilterd op een zo significant mogelijk (> 2 K en langdurig aanwezig) temperatuurverschil tussen de aanvoer- en retourtemperaturen geregistreerd door de warmtepomp, en een zo hoog mogelijk PWM signaal (debiet) gedurende dezelfde periode. Tegelijkertijd wordt binnen de DTS-dataset gefilterd met een focus op een duidelijk verschil in geregistreerde temperatuur (gemiddeld over lengte boorgat) tussen de op- en neergaande benen van de U-lus gedurende een langere periode. Voor de warmtevragen wordt ook specifiek gekeken naar de atmosferische temperatuur in de omgeving van Hoogezand, en gefocust op de koudste periodes.

J.1.3 Variaties in thermische modelparameters

Voor de geselecteerde energievragen worden verschillende scenario's doorgerekend. Hierbij worden de volgende parameters gevarieerd (zie Tabel- 5). Doel hierbij is om te kunnen inschatten of het gebruik van de gemeten waardes uit de TRT tests een andere (betere) match geven met de monitoringsdata, dan de geschatte waardes uit het originele ontwerp. Bij de scenario's waarbij de temperatuur lateraal variabel wordt geacht, wordt een radiaal aflopend (zomer) of oplopend (winter) initieel temperatuurprofiel rond de bodemwarmtewisselaar aangebracht, om rekening te houden met eventuele eerdere energievraag pulsen vanuit het boorgat. Bij het instellen van deze radiale temperatuurgradiënt wordt onder andere gebruik gemaakt van de temperaturen gemeten in observatieboorgat O8 vlak voor de energievragen, aangezien deze nabij de locatie van BL2 is gelegen. In de andere scenario's is de temperatuur in de rest van het model hetzelfde als ter hoogte van de bodemwarmtewisselaar op dezelfde diepte (zie ook Figuur J-2)

Tabel- 5 Variaties in bodemparameters gebruikt in Feflow modellering.

Parameter	Opties
Warmtegeleiding bodem (W/mK)	2,2 (ontwerp GH) – 3,1 (TRT)
Warmtecapaciteit bodem (MJ/m ³ K)	2,5 (ontwerp GH) – 2,0 (TRT)
Initiële bodemtemperatuur (°C)	Temperatuur uniform over geheel model Temperatuur uniform lateraal, verschillend met diepte Temperatuur verschillend zowel lateraal als met diepte



Figuur J-2 Schematische representatie verschillende opties initiële temperatuurverdeling binnen 3D Feflow model rond bodemwarmtewisselaar (zwarte cilinder).

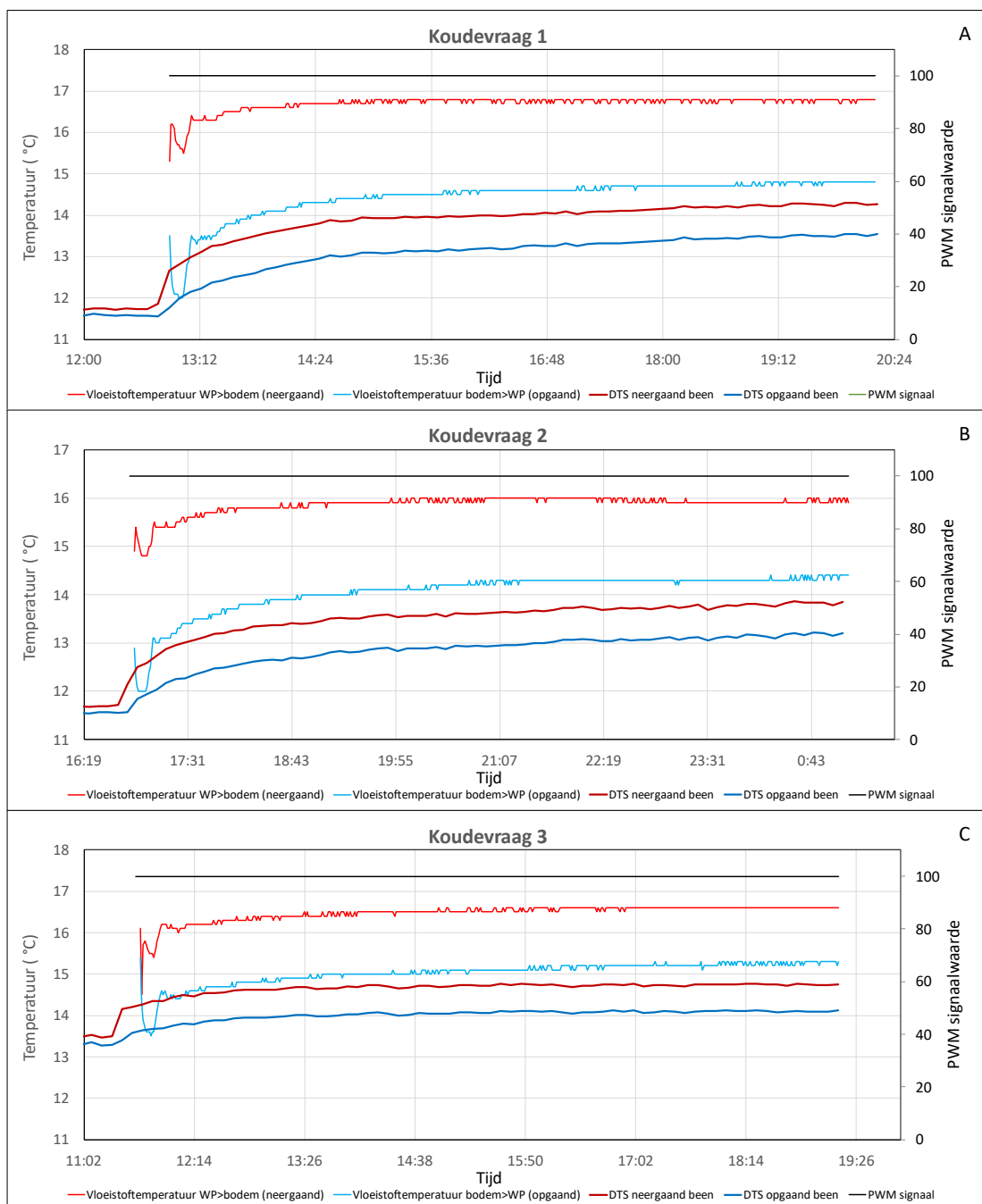
J.1.4 Gebruik Feflow modelpakket

Binnen de bodemwarmtewisselaarsmodule in Feflow zijn een veelvoud van opties beschikbaar met betrekking tot het berekenen van de temperatuurontwikkeling in een bodemwarmtewisselaar. Een volledig overzicht van de specificaties, voordelen en nadelen van de verschillende mogelijkheden is te uitgebreid binnen de context van het huidige rapport. Voor een complete uiteenzetting hiervan wordt verwezen naar de documentatie van Feflow (Diersch, 2013). Binnen het huidige project wordt, aan de hand van enkele initiële testscenario's, uitgegaan van een model dat gebruik maakt van de volledig numerieke oplossingsmethodiek gebaseerd op het werk van Al-Khoury et al. 2005 en Al-Khoury & Bonnier 2006, en waarbij de thermische weerstanden binnen het boorgat worden uitgerekend door het model zelf.

J.2 Resultaten

J.2.1 Geselecteerde koudevragen

Aan de hand van de hierboven genoemde uitgangspunten zijn uit de datasets meerdere koudevragen gefilterd. Enkel hiervan zijn weergegeven in Figuur J-3. Deze hebben voornamelijk dezelfde karakteristieken. In alle gevallen is er sprake van een constant PWM-signaal van '100' wat door de WP naar de circulatiepomp wordt gestuurd. Uit de analyse met betrekking tot de relatie PWM-signaal – debiet, blijkt dat dit hoogstwaarschijnlijk betekent dat de pomp voluit draait en dus het maximale debiet (0,29 l/s) levert gedurende de gehele koudevragen. Het temperatuurverschil tussen de aanvoer en retourtemperaturen geregistreerd door de warmtepomp is in alle gevallen ca. 2 K. Het verschil in geregistreerde temperatuur (gemiddeld over lengte boorgat) tussen de op- en neergaande benen van de U-lus is in alle gevallen ca. 1 K. Gezien de beperkte variatie in de karakteristieken van de koudevragen is voor de modellering in Feflow alleen koudevraag 1 gebruikt.

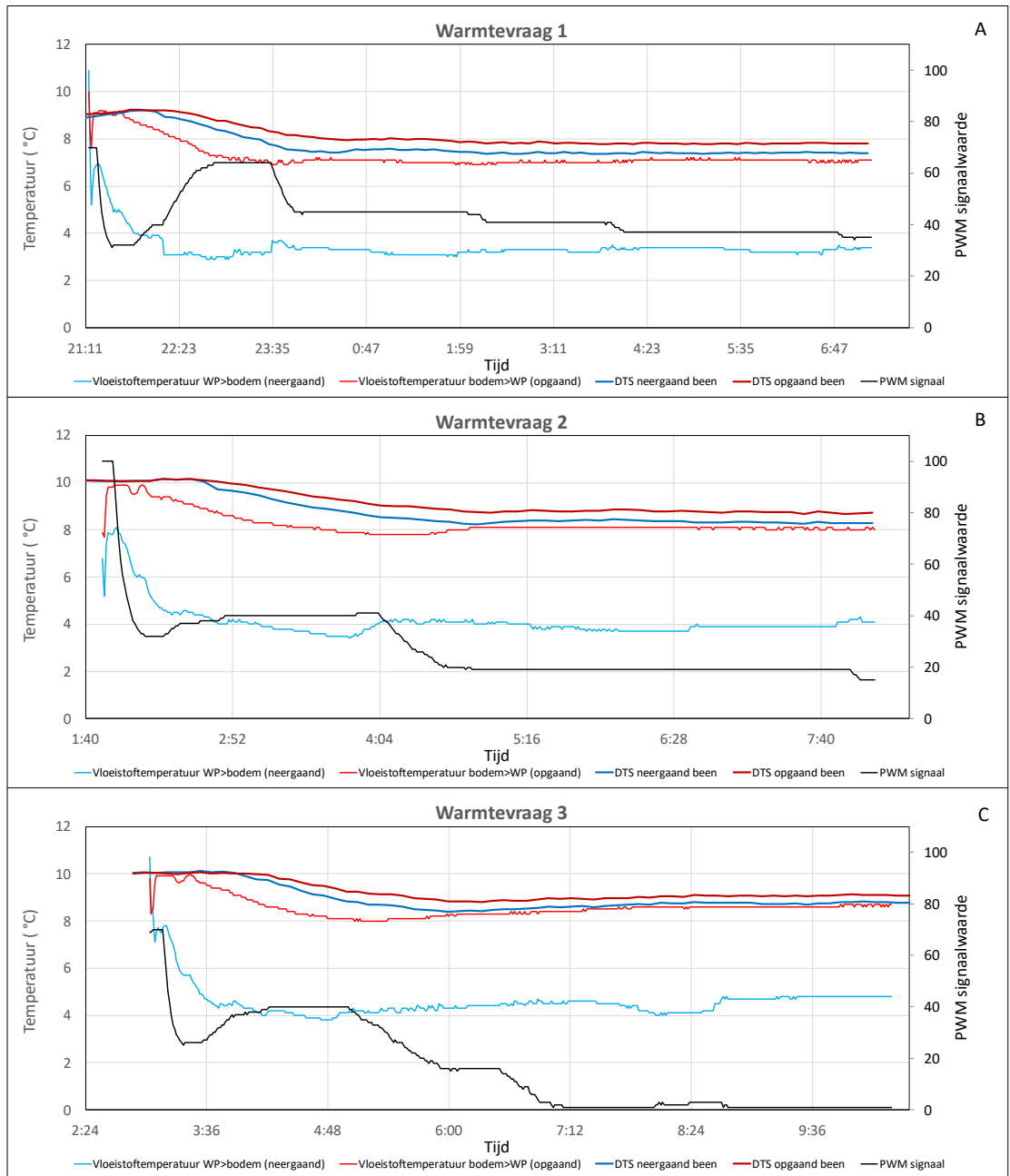


Figuur J-3 Overzicht HP24 data en DTS data voor enkele koudevragen. Weergegeven vloeistoftemperaturen zijn gemeten in de warmtepomp. Weergegeven DTS temperaturen zijn gemiddeld over gehele lengte boorgat.

J.2.2 Geselecteerde warmtevragen

Enkele geselecteerde warmtevragen zijn te zien in Figuur J-4. Ook hier zijn veel overeenkomsten tussen de verschillende energievragen. In alle gevallen is er sprake van een ΔT over de verdamperkant van de warmtepomp van ca. 4 K. Het resulterende temperatuurverschil tussen de DTS-temperaturen gemeten direct naast de op en neergaande benen in het boorgat, is in alle gevallen veel kleiner, max 0,5 K. Ook de absolute afname in temperaturen in het boorgat ten opzichte van de temperatuur vlak voor de energievraag, is relatief beperkt. Dit hangt samen met het feit dat het debiet niet maximaal lijkt te zijn. In alle gevallen (ook warmtevragen welke wel uit de database gefilterd zijn, geanalyseerd zijn, maar hier niet weergegeven) is er sprake van enorme variaties in de PWM-waarden welke gedurende de warmtevragen zijn geregistreerd. In geen enkel geval zijn deze echter

langdurig in de buurt van het maximum (100) zoals bij de koudevragen uit Figuur J-3. Meestal beginnen deze wat hoger en nemen vrij snel af tijdens de energievragen. Ook hier is gezien de beperkte variatie in de karakteristieken voor de modellering in Feflow alleen warmtevraag 1 gebruikt.



Figuur J-4 Overzicht HP24 data en DTS data voor enkele warmtevragen. Weergegeven vloeistoftemperaturen zijn gemeten in de warmtepomp. Weergegeven DTS temperaturen zijn gemiddeld over gehele lengte boorgat

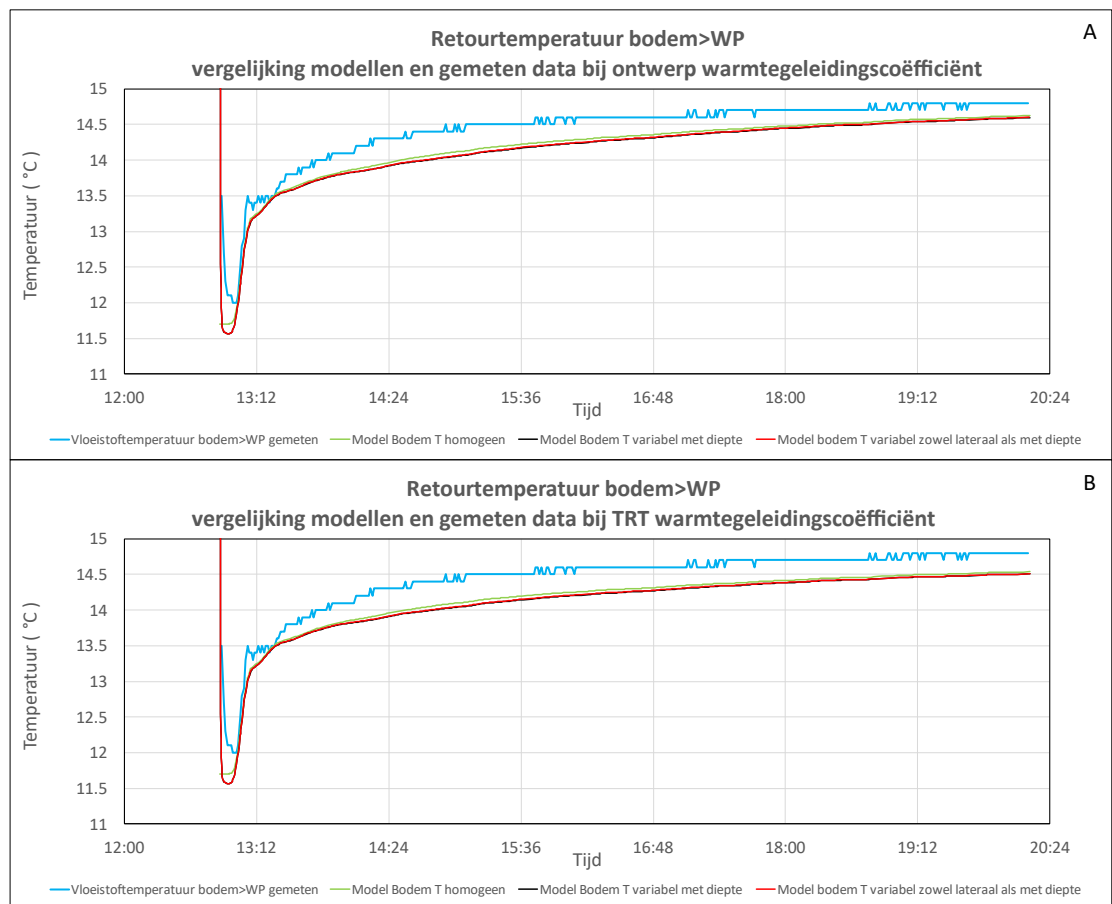
J.2.3

Resultaten modelberekeningen Feflow geselecteerde koudevraag

Figuur J-5 geeft twee vergelijkingen van de retourtemperatuur van de circulatievloeistof tussen de drie verschillende opties met betrekking tot de initiële temperatuurcondities, en de gemeten data. Figuur J-5 a geeft de resultaten voor een lagere warmtegeleiding in de bodem overeenkomstig met het originele ontwerp, Figuur J-5 b laat de resultaten zien voor een hogere warmtegeleiding overeenkomstig met de bevindingen van de TRT's.

Uit deze resultaten blijkt derhalve dat de scenario's met zowel in de diepte als lateraal variatie in het initiële temperatuurprofiel in de bodem, op de relatief korte tijdsschaal van de geselecteerde energievragen, geen noemenswaardige verschillen opleveren ten opzichte van de scenario's met alleen variatie in de temperatuur met diepte. Het model met een uniform initieel temperatuurprofiel in de bodem verschilt wel enigszins van de andere twee, maar ook dit is redelijk beperkt: ca. 0.1 K bij initiële doorspoeling van de lus aan het begin van de energievraag, < 0,05 K de rest van de duur van de energievraag.

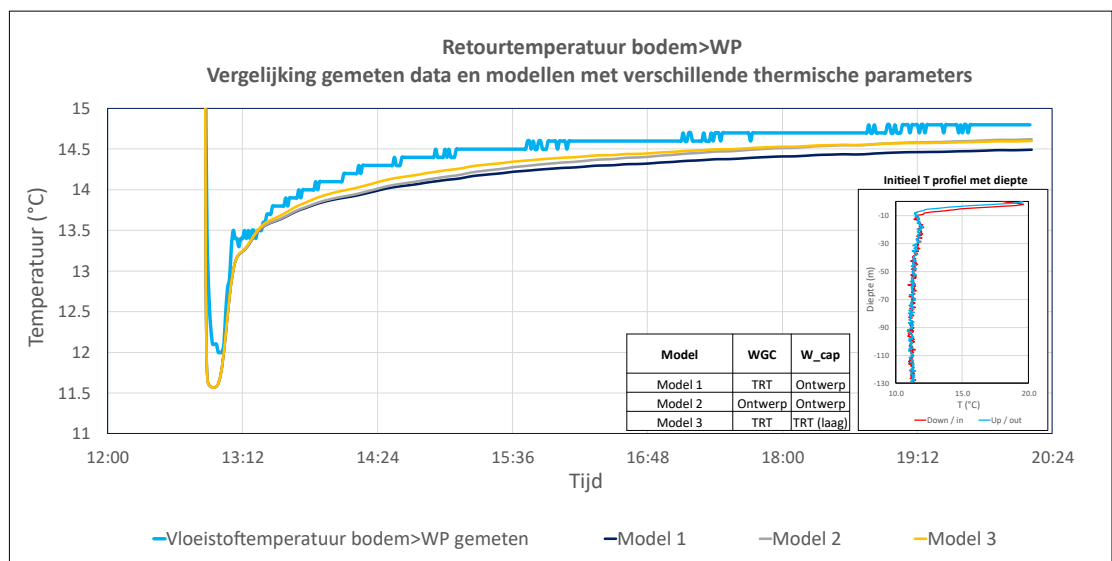
Gezien de relatief geringe verschillen tussen deze scenario's, worden ten behoeve van de overzichtelijkheid van de verder gepresenteerde figuren alleen de resultaten getoond voor de scenario's 'Bodem T variabel met diepte'. Een met diepte variabele temperatuurconditie ligt dichterbij de werkelijkheid dan een compleet homogene temperatuurverdeling en is daarom nuttiger om te vergelijken met de gemeten waarden.



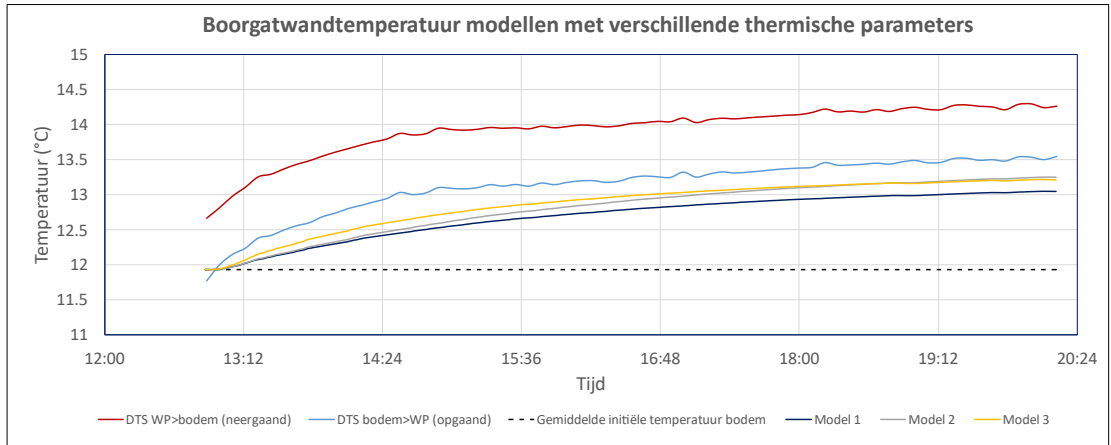
Figuur J-5 Overzicht resultaten retourtemperaturen circulatievloeistof voor de drie verschillende modelopties met betrekking tot de initiële temperatuurverdeling in het model, voor warmtegeleidingscoëfficiënt gebaseerd op het originele ontwerp (A) en de resultaten (B).

Figuur J-6 geeft een vergelijking van enkele resultaten met betrekking tot de vloeistoftemperatuur voor de scenario's met een initiële temperatuurconditie variabel met diepte, met verschillende thermische parameters voor de bodem. Het doorspoelen van de lus geeft precies dezelfde reactie (vloeistoftemperatuur benaderd gemiddelde waarde gemiddelde initiële bodemtemperatuur) voor alle scenario's. Na ca. een half uur lopen de verschillende modellen wat uit elkaar wat betreft het exacte verloop van de retourtemperatuur. Het scenario met een hogere warmtegeleidingscoëfficiënt en een lagere warmtecapaciteit (model 3) lijkt qua vorm hierbij de meeste overeenkomsten te hebben met de gemeten data. Desalniettemin komen alle modellen uit op een iets lagere retourtemperatuur vergeleken met de gemeten data (verschil ca. 0,2 – 0,3 K).

Figuur J-7 geeft een vergelijking van enkele resultaten met betrekking tot de gemiddelde boorgatwandtemperatuur uit de Feflow modellen. Hier zitten enkele tienden van een graad verschil in tussen de verschillende modelscenario's. Daarnaast laat de figuur ook een vergelijking zien van deze waarden met de initiële gemiddelde temperatuur in de bodem, en de temperaturen gemeten door de glasvezelkabels tegen de lusbenen van de U-lus aan in het boorgat. Alle resultaten voor de verschillende modellen vallen hierbij tussen de initiële gemiddelde bodemtemperatuur en de met de DTS gemeten temperaturen.



Figuur J-6 Overzicht resultaten retourtemperaturen circulatievloeistof voor verschillende combinaties van warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit gebaseerd op het originele ontwerp en de resultaten van de TRT's.

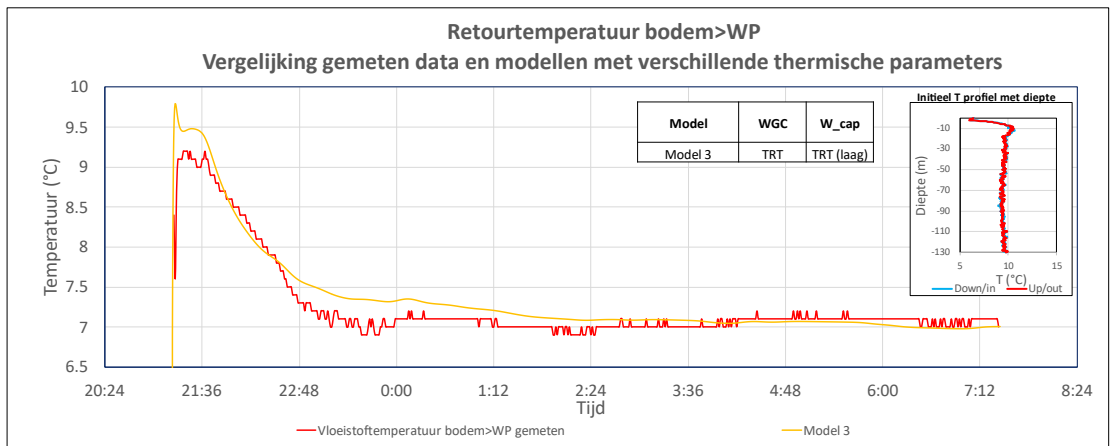


Figuur J-7 Overzicht resultaten gemiddelde boorgatwandtemperaturen voor verschillende combinaties van warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit gebaseerd op het originele ontwerp en de resultaten van de TRT's. Deze zijn afgezet tegen de gemiddelde initiële temperatuur van de bodem/lus en de gemeten DTS temperaturen gedurende koudevraag 1.

J.2.4

Resultaten modelberekeningen Feflow geselecteerde warmtevraag

Het toepassen van een geschatte lineaire relatie tussen PWM-sigitaalwaarden en debiet bleek geen consistente resultaten op te leveren. Zowel qua vorm van het verloop als qua absolute waarden, weken de resultaten uit alle Feflow modellen significant af van de in de warmtepomp gemeten waarden. Gezien de relatief grote invloed van het debiet op de ontwikkeling van de retourtemperatuur van de vloeistof, is het ontbreken van duidelijke informatie daarover gedurende de warmtevraag een complicerende factor. Een onderscheid maken tussen de geldigheid van verschillende thermische parameters van de bodem, zoals weergegeven voor de koudevraag (Figuur J-8), is hierdoor niet mogelijk. Aan de hand van het model met de beste resultaten met betrekking tot de koudevraag (model 3) is wel gepoogd een debiet te schatten waarbij de gemodelleerde retourtemperatuur tijdens de geselecteerde warmtevraag het dichtst in de buurt komt van de gemeten waarden. Figuur J8 geeft daar het resultaat van. Ondanks de verschillende stappen in PWM-waarden die door de warmtepomp zijn verstuurd naar de circulatiepomp, lijkt uit de Feflow modellering te volgen dat een constant debiet van ca. 0,12 l/s de beste fit geeft met de gemeten data.



Figuur J-8. Overzicht resultaat retourtemperatuur circulatievloeistof gedurende geselecteerde warmtevraag. Scenario is voor het model met beste fit voor de koudevraag, en met een constant debiet van 0,12 l/s.

J.3 Discussie bevindingen

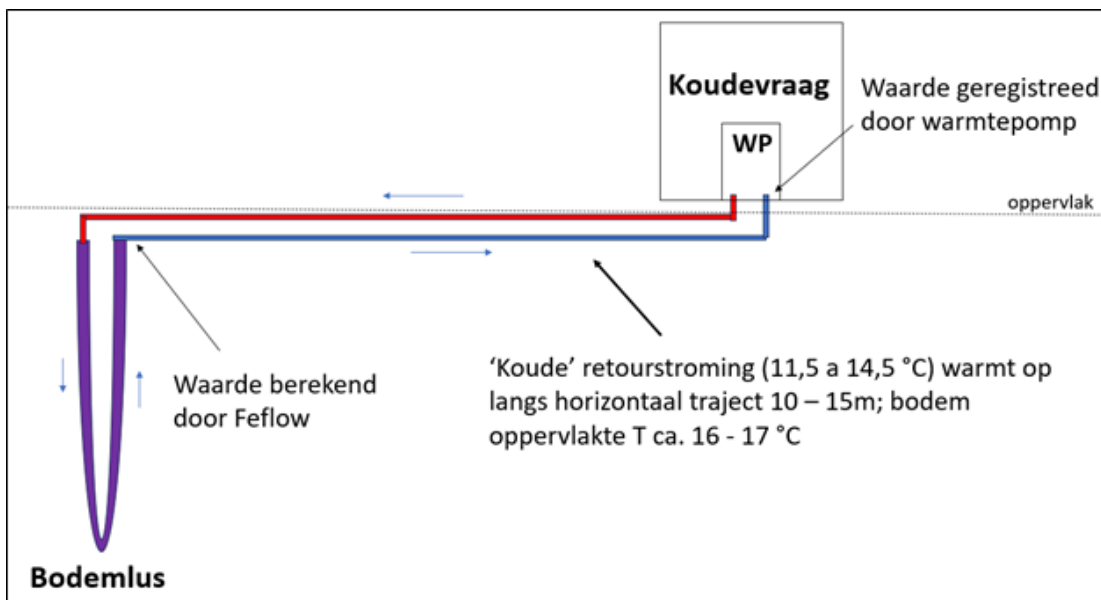
J.3.1 Thermische parameters bodem

De boorgatwandtemperaturen uit Figuur J-7 vallen binnen het bereik waar ze verwacht zouden worden. Duidelijke inzichten met betrekking tot de validiteit van de gebruikte thermische bodemparameters kunnen hieraan echter niet worden verbonden. Binnen de daadwerkelijk gemeten data uit het boorgat is geen evenknie beschikbaar waarmee de gemodelleerde boorgatwandtemperaturen vergeleken kunnen worden. Weliswaar zijn er met de glasvezelkabels temperaturen gemeten in het boorgat tegen de lusbenen aan, maar gezien de relatief grote temperatuurgradiënt die er in een boorgat van binnen naar buiten verwacht kan worden, zal er altijd een significant verschil zijn tussen de temperatuur direct naast een lusbeen en de temperatuur aan de rand van een boorgat. In principe bevestigen de gemodelleerde resultaten dit: de boorgatwandtemperaturen zijn in alle gevallen lager dan de temperaturen gemeten met de DTS, maar tegelijkertijd maakt dit het verder moeilijk om harde conclusies hieraan te verbinden.

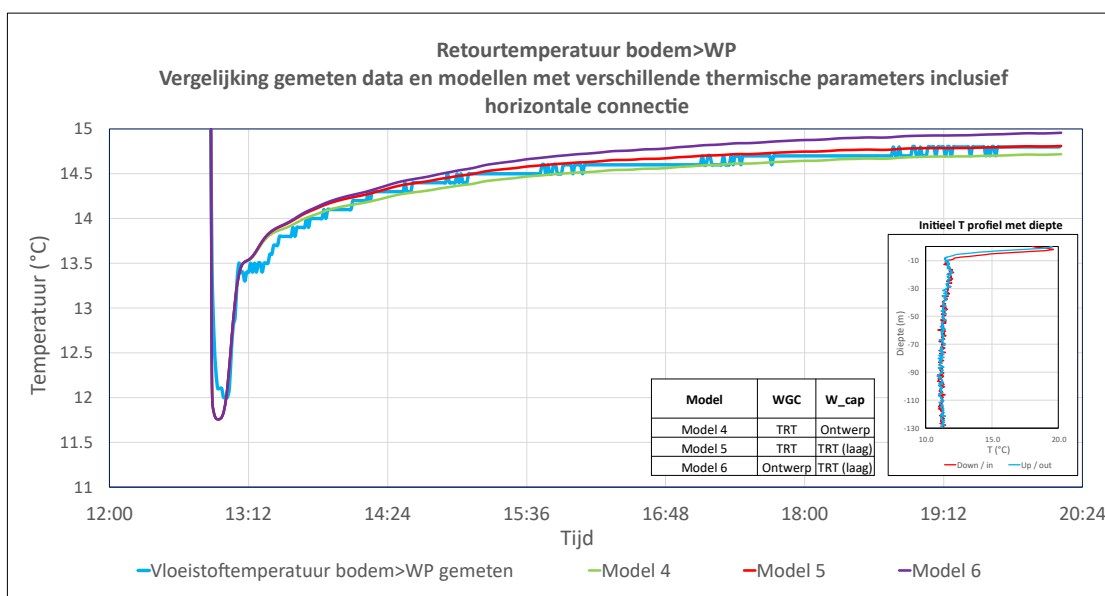
Van de in de vorige paragraaf gepresenteerde grafieken zijn met name de resultaten met betrekking tot de ontwikkeling van de vloeistoftemperaturen gedurende de geselecteerde koudevraag bruikbaar om interpretaties te maken met betrekking tot de validiteit van de gebruikte thermische bodemparameters. Zoals eerder benoemd lijkt model 3 de beste fit te hebben qua vorm met de gemeten data, maar ook deze zit gedurende de gehele energievraagperiode enkele tienden lager dan de data zoals geregistreerd in de warmtepomp.

Het feit dat dit verschil ook aanwezig is in het begin van de energievraag tijdens het doorspoelen van de lus, lijkt erop te wijzen dat dit niet (alleen) verklaard kan worden door een verschil in thermische eigenschappen van de bodem tussen de werkelijkheid en de gedraaide modellen. Het verschil tussen de in de warmtepomp gemeten vloeistoftemperaturen en de door de modellen geproduceerde vloeistoftemperaturen zou ook te maken kunnen hebben met het horizontale traject wat nog tussen de verticale lus en het appartement (de warmtepomp) zit. Figuur J-9 geeft een schematisatie van dit idee. Wanneer gedurende de zomermaanden een (relatief) warmere vloeistof naar de verticale bodemlus gestuurd wordt, en een (relatief) koudere vloeistof uit de verticale bodemlus retour komt, kan de vloeistof additioneel opwarmen door het feit dat het horizontale traject van 10-15 m terug naar het gebouw zich bevindt in het gedeelte van de bodem waar de temperatuur het hoogst is. Als gevolg daarvan warmt de retourvloeistof weer een beetje op voordat de temperatuur wordt geregistreerd door de warmtepomp. In het eerder gebruikte standaard Feflow model wordt geen horizontale connectie beschouwd, dit is echter wel mogelijk om in te bouwen in het model.

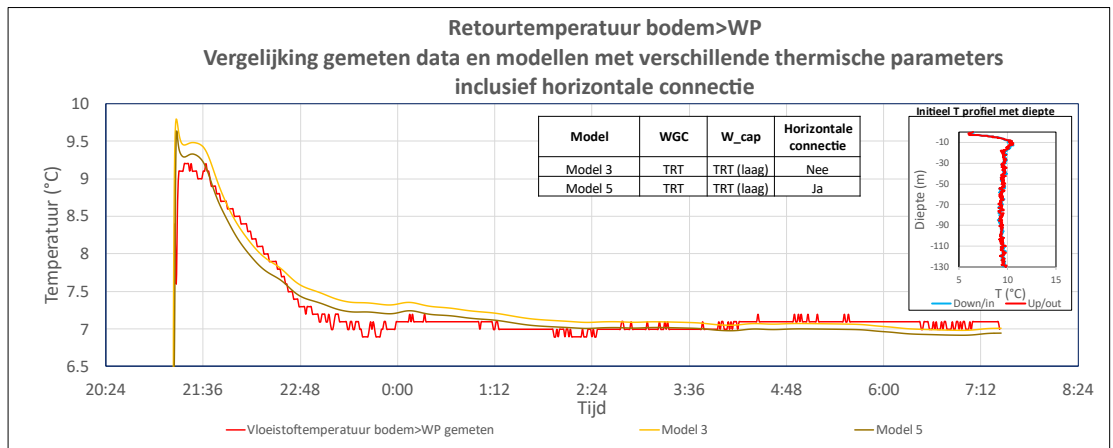
Figuur J-10 geeft een vergelijking van enkele resultaten met betrekking tot de vloeistoftemperatuur voor dezelfde scenario's als in Figuur J6, alleen ditmaal met inachtneming van een horizontale connectie van ca. 10m, één meter onder het maaiveld. Hieruit blijkt dat een toevoeging van een horizontaal traject tot een betere overeenkomst leidt tussen de modelresultaten en de gemeten data. Figuur J-11 laat het effect zien voor de geselecteerde warmtevraag. Ook daar is er sprake van een effect van de horizontale connectie, echter ditmaal is het een afkoelend effect, aangezien de bovenste meters van de bodem in de winter juist kouder zijn dan de bodem op grotere diepte. In beide gevallen zorgt de horizontale connectie voor een 'tegenwerkend' effect met betrekking tot de efficiëntie van het systeem.



Figuur J-9. Schematische weergave invloed horizontaal leidingtraject op verschil in gemeten en gemodelleerde retourtemperaturen tijdens een koudevraag.



Figuur J-10 Kwantificatie invloed horizontaal leidingtraject op verschil in gemeten en gemodelleerde retourtemperaturen tijdens een koudevraag.



Figuur J-11. Kwantificatie invloed horizontaal leidingtraject op verschil in gemeten en gemodelleerde retourtemperaturen tijdens een warmtevraag.

Binnen een ‘normale’ ontwerpprocedure wordt hier over het algemeen geen rekening mee gehouden, wat tot een kleine onderschatting van de hoeveelheid verticale boormeters kan leiden om de vloeistoftemperaturen te kunnen leveren welke benodigd zijn om een specifiek rendement te kunnen behalen. Gezien de ogenschijnlijke omvang van het effect (enkele tienden van een graad bij ca. 10m horizontale connectie), lijkt dit echter een relatief beperkt effect (< 2% op rendement), vergeleken met andere onzekerheden binnen het ontwerp van een GBES (e.g. energievraagpatroon vanuit woning). Desalniettemin kan het nuttig zijn om hier wel rekening mee te houden, zeker bij systemen waarbij er sprake is van omvangrijkere verslepingstrajecten tussen de verticale wisselaars en het gebouw waar de warmtepomp staat.

J.3.2 Eigenschappen in de praktijk optredende warmtevragen

Binnen de gebruikelijke ontwerpprocedure voor GBES wordt over het algemeen uitgegaan van een pieklast op vol verdampervermogen en een duur van enkele (orde van grootte 6-12) uren. Uit de gegevensdatabases voor appartement X en BL2 blijken eigenlijk nergens dergelijke energievragen te identificeren. Zoals ook te zien in de rode lijnen in Figuur J4 beginnen warmtevragen na het initiële doorspoelen vaak wel met een significante verlaging in de retourtemperatuur vanuit de bodem naar de warmtepomp, maar stabiliseert deze al redelijk snel binnen ca. 2 uur. Uit de temperaturen gemeten in het boorgat blijkt een korte afname nadat een energievraag is gestart, maar ook daar treedt al redelijk snel stabilisatie op. Opmerkelijk is ook het relatief kleine verschil wat er tussen de temperaturen nabij de twee lusbenen lijkt te zijn tijdens de warmtevragen (<0,5 K), vergeleken met wat tijdens de koudevragen te zien was (ca. 1 K).

Een oorzaak hiervan zou kunnen zijn dat de warmtepomp niet lang zijn volle vermogen dient te leveren. De ‘WZSV 62’ warmtepompen van Alpha Innotec, die gebruikt worden binnen dit project, hebben een modulerende compressor, wat betekent dat het aan de bodem onttrokken vermogen kan worden geschaald op basis van de exacte vraag vanuit de woning. Uit de beschikbare data met betrekking tot de totale energievragen voor alle appartementen over de gehele metingsperiode, bleek zoals eerder gezegd dat de totale warmtevraag aan de bodem iets kleiner was dan ontworpen, maar zeker wel in dezelfde orde van grootte. De totale warmtevragen van appartement X over de gehele meetperiode zijn niet bekend, maar het lijkt niet aannemelijk dat het ontbreken van echte pieklasten alleen veroorzaakt wordt door inactiviteit van dit specifieke systeem. Uit de hier gepresenteerde waarnemingen lijkt het aannemelijker dat de warmtevragen simpelweg voornamelijk in deellast geleverd worden, verspreid over langere periodes.

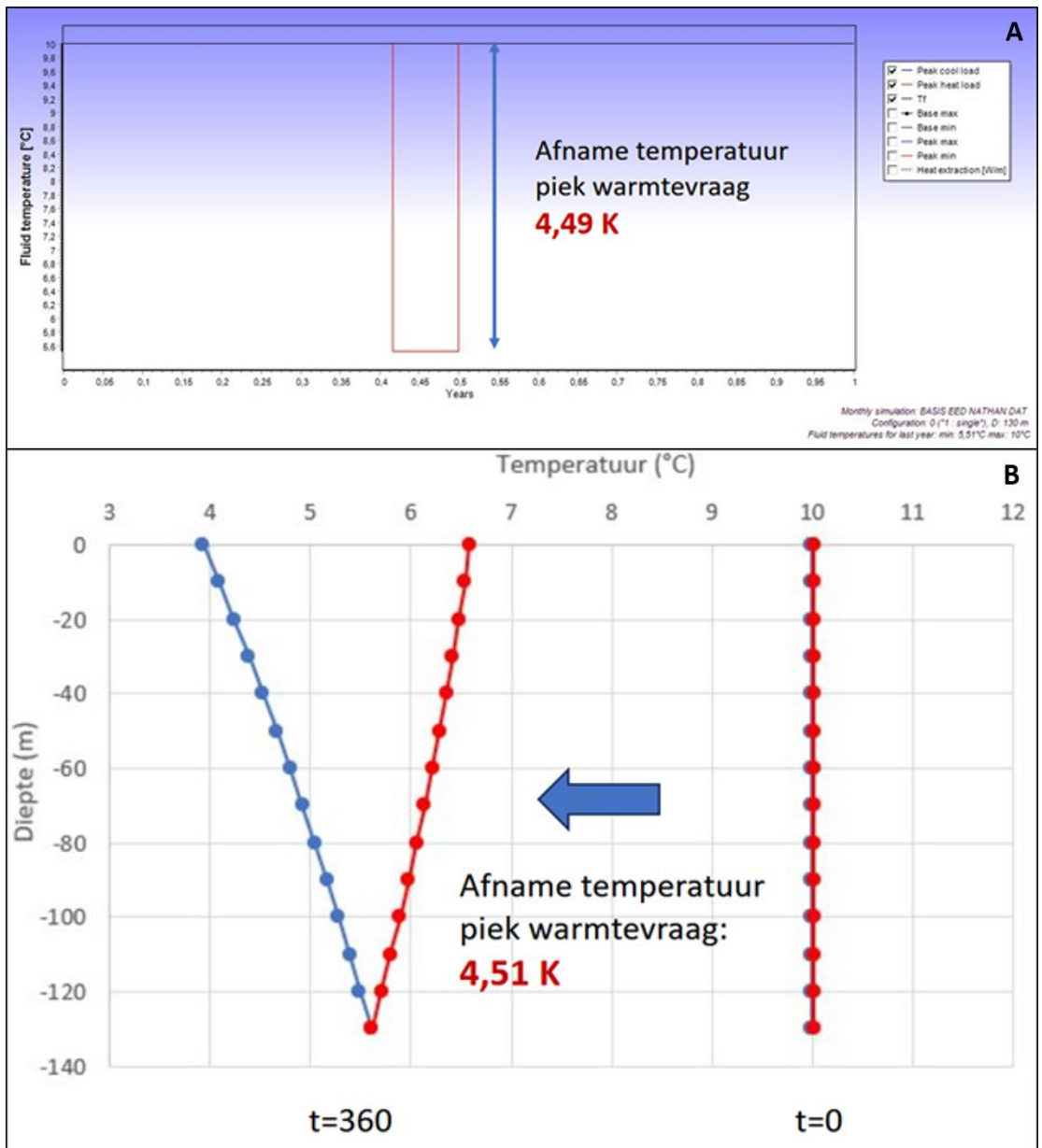
J.3.3 Toetsing standaard ontwerpsoftware voor pieklasten

Zoals in de bovenstaande paragraaf beschreven lijkt er bij deze projectlocatie geen sprake te zijn van echte langdurige pieklasten op vol vermogen. Dit betekent echter natuurlijk niet dat deze in de praktijk nooit voorkomen. Afhankelijk van de eigenschappen van een gebouw, zijn gebruikers en de dimensionering van de warmtepomp, is het zeker mogelijk dat dit bij andere bodemenergiesystemen wel als dusdanig voorkomt.

De binnen het huidige project verkregen inzichten met betrekking tot het modelleren van individuele energievragen kunnen helpen met het toetsen in hoeverre de vaak gebruikte 'standaardsoftware' EED het effect van een pieklast adequaat kan voorspellen. De omvang en duur van een verwarmingspieklast heeft binnen deze software over het algemeen een vrij grote invloed op de voorspelde benodigde hoeveelheid boormeters om een bepaalde minimale vloeistoftemperatuur te kunnen garanderen. In Figuur J-12a is een uitdraai uit EED te zien welke het effect weergeeft van een geïsoleerde 4 kW (condensorzijdig) pieklast van 6 uur. Dit vermogen en de pieklastduur zijn overgenomen uit het originele ontwerp opgesteld voor de systemen binnen het project in Hoogezand. Het verlagingseffect op de gemiddelde temperatuur van de circulatievloeistof ten opzichte van de basislast (welke in dit geval op 0 is gezet voor de overzichtelijkheid) bedraagt 4,49 K.

Vervolgens is met de Feflow module, welke met de gekozen instellingen in staat was de respons van de geselecteerde koudevraag accuraat na te bootsen, eenzelfde pieklast gesimuleerd. Figuur J12-b geeft een grafiek met de resultaten van deze simulatie. In tegenstelling tot EED geeft het Feflow model een temperatuurverloop binnen beide benen van de U-lus dat ook diepteafhankelijk is. Vandaar dat een 'V' vorm ontstaat wanneer energie onttrokken wordt met de bodemlus. Wanneer het gemiddelde van de temperaturen uit de lusbenen echter genomen wordt, kan een temperatuur aan het einde van de 6 uur pieklast (minuut 360) van 5,49 °C berekend worden. Vanaf een uniforme initiële temperatuur van 10 °C (gelijkgezet met hoe dit in EED ingevoerd was) betreft dit derhalve een afname van 4,51 K, wat nagenoeg gelijk is aan de waarde van 4,49 K die EED uitrekende.

Op basis hiervan lijken de modelprincipes van de huidige 'standaardsoftware' met betrekking tot het rekenen aan temperatuurverlagingen als gevolg van pieklasten op korte tijdschalen in ieder geval goed te functioneren.



Figuur J-12. Vergelijking gemiddelde temperatuurafname circulatormedium bij verwarmingspieklast van 4 kW condensorvermogen en 6 uur pieklastduur tussen EED (A) en geoptimaliseerd Feflow model (B).

J.4 Conclusies

Onderstaand worden de belangrijkste conclusies van de analyse samengevat:

- Invloed van warmtegeleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit van de bodem op het temperatuurverloop van de vloeistoftemperaturen tijdens kortstondige pieklasten is relatief beperkt. Afwijkingen tussen scenario's met verschillende waarden voor deze twee parameters bedragen hoogstens enkele tienden van graden. Desalniettemin kan op basis van de hier gepresenteerde resultaten met enige zekerheid geconcludeerd worden dat de waarden gemeten bij de TRT inderdaad een betere fit geven voor de temperatuurontwikkeling van de circulatievloeistof tussen de modelresultaten en de door de warmtepomp op locatie gemeten data.
- Het horizontale traject tussen de verticale wisselaar en het gebouw lijkt een negatief effect te hebben op de inkomende vloeistoftemperatuur bij de warmtepomp. Qua omvang betreft dit binnen het huidige project een relatief klein effect op het rendement, maar bij projecten met omvangrijkere verslepingen in de ondiepe ondergrond kan dit effect groter zijn.
- Warmtevraag pieklasten voor de combinatie van het type appartement en het type warmtepomp binnen het huidige project lijken met name korte pulsen te zijn, waarna al redelijk snel wordt teruggeschakeld in vermogen. Met dergelijk gedrag beter rekening houden binnen een ontwerp, zou een (besparende) invloed kunnen hebben op de benodigde hoeveelheid boormeters.
- 'Standaard software' EED geeft voor een berekening van een korte termijn temperatuur-verandering, als gevolg van een pieklast, geen grote verschillen ten opzichte van het gekalibreerde Feflow model. De vereenvoudigde modelprincipes van EED (en eventuele andere programma's die gebruik maken van dezelfde aannames) lijken daarom voldoende nauwkeurig.

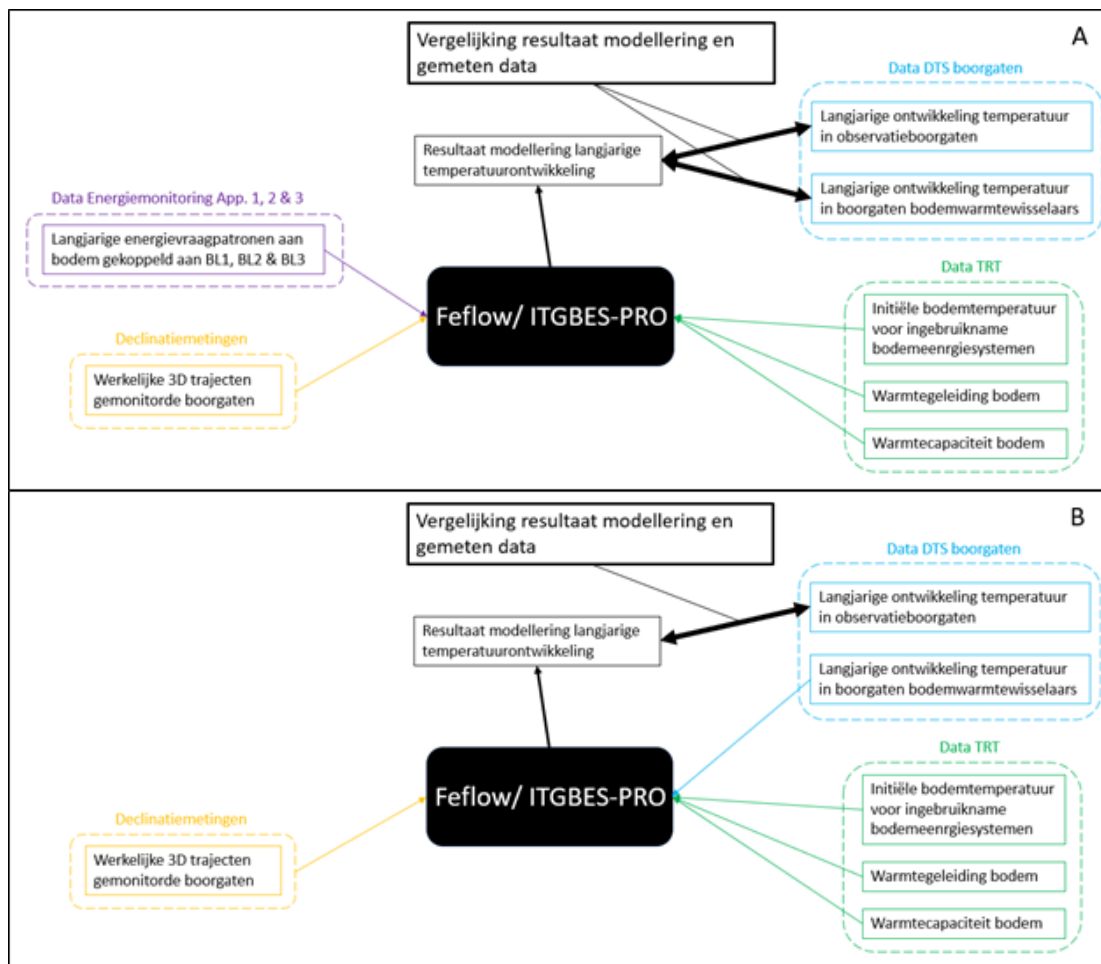
K Toetsing rekenmethoden voor bepaling van interferentie

Het rekenen aan langjarige thermische effecten tussen verschillende gesloten bodemenergiesystemen (interferentie) gebeurt in de praktijk in Nederland voornamelijk met behulp van software die enkel uitgaat van warmtetransport door geleiding. De basis hiervoor is meestal een oplossing van de 'lijnbronmethode' (e.g. Carslaw & Jaeger 1959, Eskilson 1987, Zeng et al. 2002). Ook de standaard 'interferentietool' beschikbaar via het SIKB (ITGBES, Groenholland 2019), maakt gebruik van correlaties gebaseerd op berekeningen uitgevoerd met een dergelijk model (ITGBES-PRO).

Zeker in dikkere (nieuwbouw)wijken, of bij appartementencomplexen zoals binnen dit project in Hoogezand, waar tientallen systemen dicht op elkaar gerealiseerd worden, is de thermische invloed van systemen onderling een aspect waar rekening mee gehouden dient te worden binnen een ontwerp. Het accuraat kunnen voorspellen van de langjarige (25 – 30 jaar) temperatuurontwikkeling in de bodem op locaties met meerdere systemen is daarom essentieel. Doel van deze analyse is, om op basis van de monitoringsdata verzameld binnen het huidige project, te toetsen in hoeverre de aannames met betrekking tot warmtetransport in de bodem gebruikt in de nu geldende 'standaardsoftware' kloppen, op locaties waar er geen sprake is van een significante grondwaterstromingscomponent.

K.1 Aanpak modellering

Voor een analyse van de langjarige ontwikkeling van de temperaturen in de bodem rond de bodemwarmtewisselaars is een combinatie nodig van monitoringsdata uit zowel het ondergrondse als het bovengrondse gedeelte van de systemen. De initieel bedachte opzet hiervoor is weergegeven in het blokschema in figuur K-1a. Zoals eerder vermeld, was er echter geen match tussen de gemonitorde boorgaten (BL1, BL2 & BL3) en de gemonitorde appartementen (App 1, 2 & 3). Weliswaar zijn energievraagpatronen bekend van de gemonitorde appartementen, maar het is niet bekend uit welke wisselaars deze energie onttrokken wordt. Uiteindelijk wordt daarom een procedure zoals weergegeven in het blokschema van Figuur K1b gevolgd. In onderstaande paragraaf wordt deze nader toegelicht.



Figuur K-1. Blok schematisatie initieel bedachte (A) en uiteindelijk toegepaste (B) procedure met betrekking tot opzet modellering langjarige temperatuurontwikkeling.

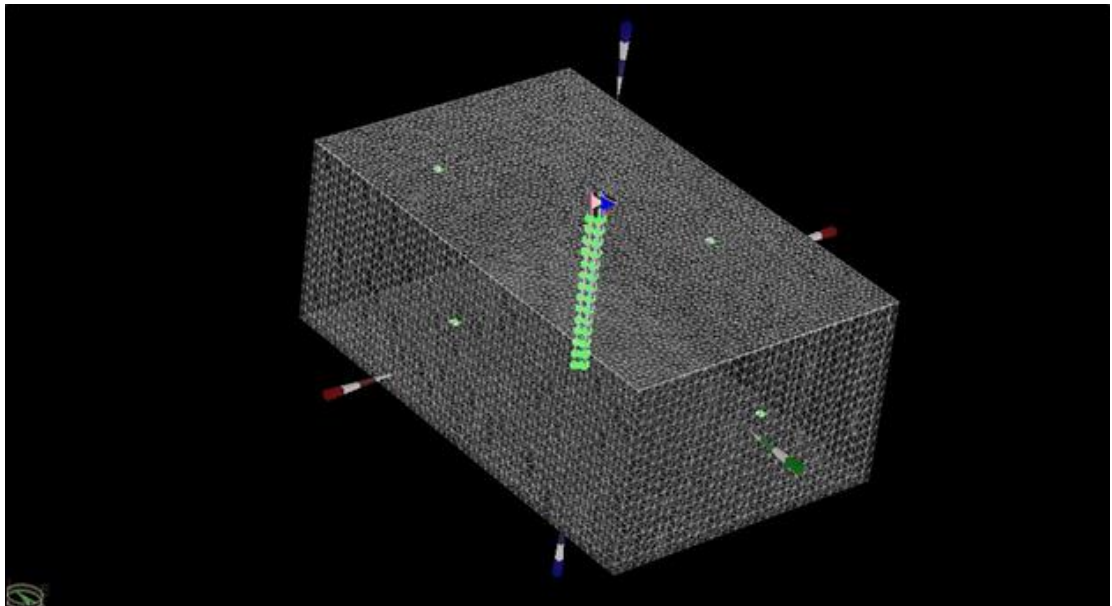
K.2 Opzet Feflow model (numeriek)

Om de temperatuurontwikkelingen in de bodem als respons op het langjarige gebruik van meerdere bodemwarmtewisselaars na te bootsen, wordt gebruik gemaakt van 'Feflow' (Diersch, 2013). Voor deze analyse wordt een model opgezet met dimensies 250x400x160m (lxbxh) waarbij alle wisselaars uit het gehele project zijn ingebouwd, evenals de observatieboorgaten (Figuur K-2). De opbouw van het modelnetwerk ('knooppunten') in de directe nabijheid van alle wisselaarsposities worden hierbij expliciet gekozen om een correcte overdracht van energie te kunnen garanderen. Op basis van de declinatiemetingen wordt in het model voor de gemonitorde bodemwarmtewisselaars en de observatieboorgaten ook rekening gehouden met het werkelijke 3D verloop van de boortrajecten.

Bij de gevolgde aanpak wordt gebruik gemaakt van de DTS-temperaturen gemeten in de gemonitorde wisselaars. Aangenomen wordt dat de temperaturen die in deze boorgaten zijn gemeten gedurende de gehele monitoringsperiode volledig kunnen worden teruggeleid naar de op dat moment onttrokken/toegevoegde energie binnen de wisselaars zelf, en dus een directe afgeleide zijn van de energievraag uit de gekoppelde appartementen. De ontwikkeling in temperaturen gemeten met de glasvezelkabels in bodemwarmtewisselaars BL1a, BL1b, BL2 en BL3 worden gemiddeld per dag en over diepte intervallen van 10 m. Deze temperaturen worden als invoerdata 'geforceerd' op de juiste knooppunten in het modelnetwerk gedurende de simulatieduur. Er wordt dus geen gebruik gemaakt van de bodemwarmtewisselaarsmodule in Feflow. Desalniettemin zorgt deze werkwijze voor eenzelfde soort temperatuurontwikkeling

in het gemodelleerde bodemvolume als wanneer een indirecte energievraag was opgelegd middels gesimuleerde bodemwarmtewisselaars in het model.

De temperatuurontwikkeling uit het model voor de trajecten van de observatieboorgaten worden vervolgens uitgelezen en vergeleken met de temperatuurontwikkeling voor de DTS-data uit deze boorgaten.



Figuur K-2. Weergave 3D Feflow model. Groene punten betreffen knooppunten per 10 m diepte, welke de trajecten van de observatieboorgaten voorstellen. Hierop worden de temperaturen gedurende de simulatie uitgelezen.

De gehele simulatie (927 dagen, jun 2021 – dec 2023) wordt meerdere keren gedraaid. In alle gevallen is de initiële bodemtemperatuur gebaseerd op de temperatuurmeting uit de TRT's, welke een goed beeld geeft van de natuurlijke achtergrondtemperatuur op het moment dat de bodemenergiesystemen in gebruik werden genomen. De temperatuur op de knooppunten aan het oppervlak van het modeldomein worden gedurende de gehele simulatie geforceerd aan de hand van oppervlaktetemperaturen gemeten op het KNMI-klimaatstation in Nieuw-Beerta. Gezien de relatief korte afstand tot Hoogezand, worden deze representatief geacht voor fluctuaties in temperatuur aan het maaiveld als gevolg van seizoensmatige atmosferische temperatuurswisselingen.

De volgende parameters worden wel gevarieerd (Tabel-6). Doel hierbij is om te kunnen inschatten of het gebruik van de gemeten waarden uit de TRT tests een andere (betere) match geven met de monitoringsdata, dan de geschatte waarden uit het originele ontwerp.

Tabel-6. Variaties in bodemparameters gebruikt in Feflow modellering.

Parameter	Opties
Warmtegeleiding bodem (W/mK)	2,2 (ontwerp GH) – 3,1 (TRT)
Warmtecapaciteit bodem (MJ/m ³ K)	2,5 (ontwerp GH) – 2,0 (TRT)

K.3 Resultaten Feflow modellering

Figuur K-3 en Figuur K-4 geven een vergelijking van de resultaten uit de Feflow modellen en de monitoringsdata voor respectievelijk de diepe en de ondiepe observatieboorgaten. Overeenkomstig met de figuren uit Bijlage I (monitoringsdata) wordt voor de Feflow modellen ook de gemiddelde berekende temperatuur over de trajecten 20 – 130 (diep) en diepte 20 m - mv gegeven (ondiep).

In Figuur K-3 is tussen de verschillende Feflow modellen in beperkte mate verschil in de resulterende temperaturen gedurende de simulatie (maximaal ca. 0,15 K tussen model 3 en model 2). Voor observatieboorgat O5 komen de modelresultaten het best overeen met de gemeten data. Het model met een hoge warmtegeleiding en lage warmtecapaciteit van de bodem (model 2), gebaseerd op de resultaten van de TRT, lijkt hierbij de meeste overeenkomsten te tonen met de gemeten data, alhoewel het verschil tussen model 2 en model 3 vrijwel verwaarloosbaar is (< 0,05 K). Er is wel een iets duidelijk verschil (ca. 0,1 K) in gemodelleerde temperatuur tussen deze twee modellen en het model met de lagere warmtegeleding (model 1).

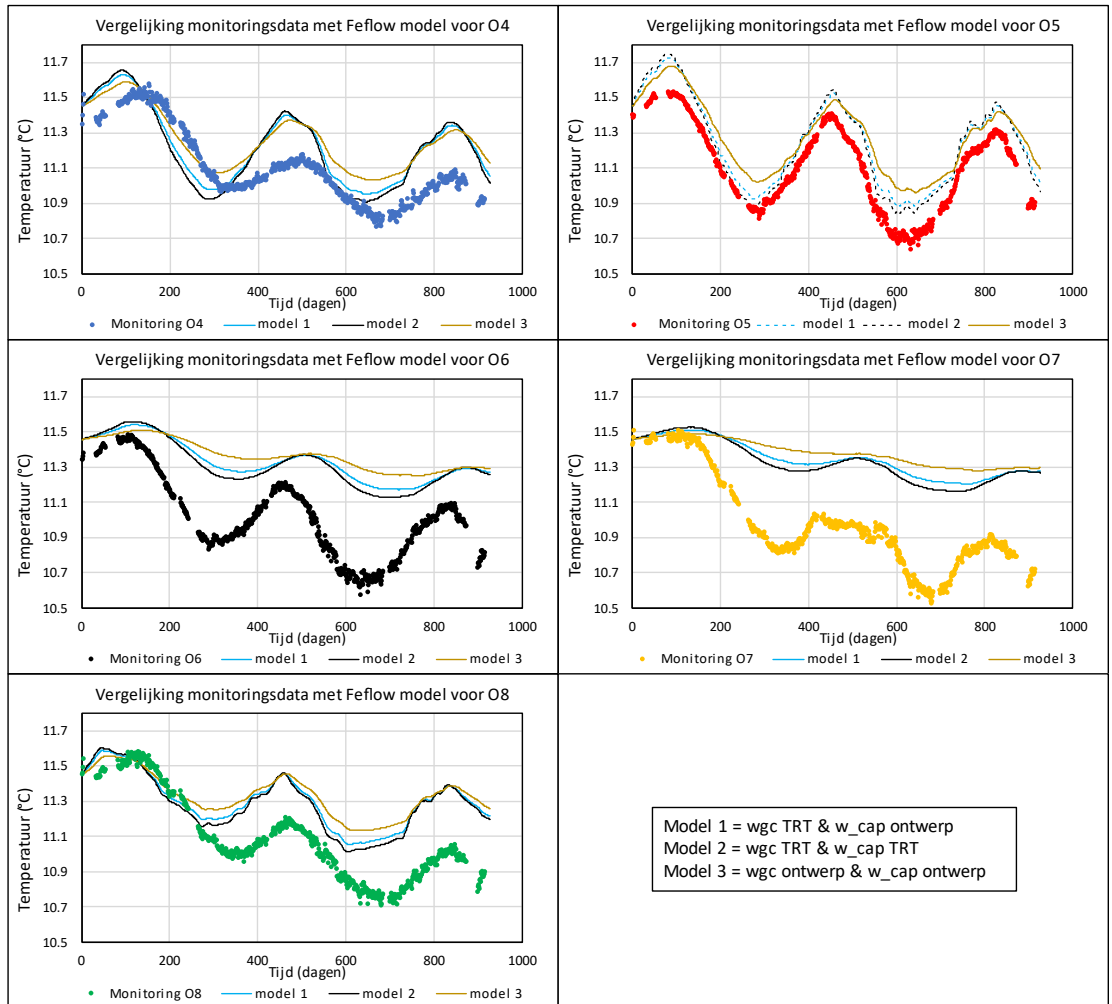
Bij de observatieboorgaten O4 en O8 komen de gemodelleerde temperaturen in het begin van de simulatie redelijk goed overeen met de gemeten data, maar worden de overeenkomsten later minder. Voor O4 is er met name sprake van een veel significantere opwarming gedurende de zomermaanden vergeleken met de daadwerkelijk gemeten temperaturen. Voor O8 lijkt de seizoenale amplitude van de temperatuurveranderingen uit de modellen relatief goed overeen te komen met de gemeten data, maar is de absolute temperatuur enkele tienden van een graad te hoog gedurende de tweede helft van de simulatieduur.

Bij de observatieboorgaten O6 en O7 komen de gemodelleerde temperaturen niet overeen met wat er gemeten is. De modellen laten slechts een kleine (ca. 0,2 K over de gehele periode) temperatuurverlaging zien, en een beperkte seizoenale amplitude. Zoals eerder opgemerkt, blijkt uit de monitoringsdata dat O7 juist het boorgat is met de meeste absolute temperatuurverlaging (ca. 0,6 K).

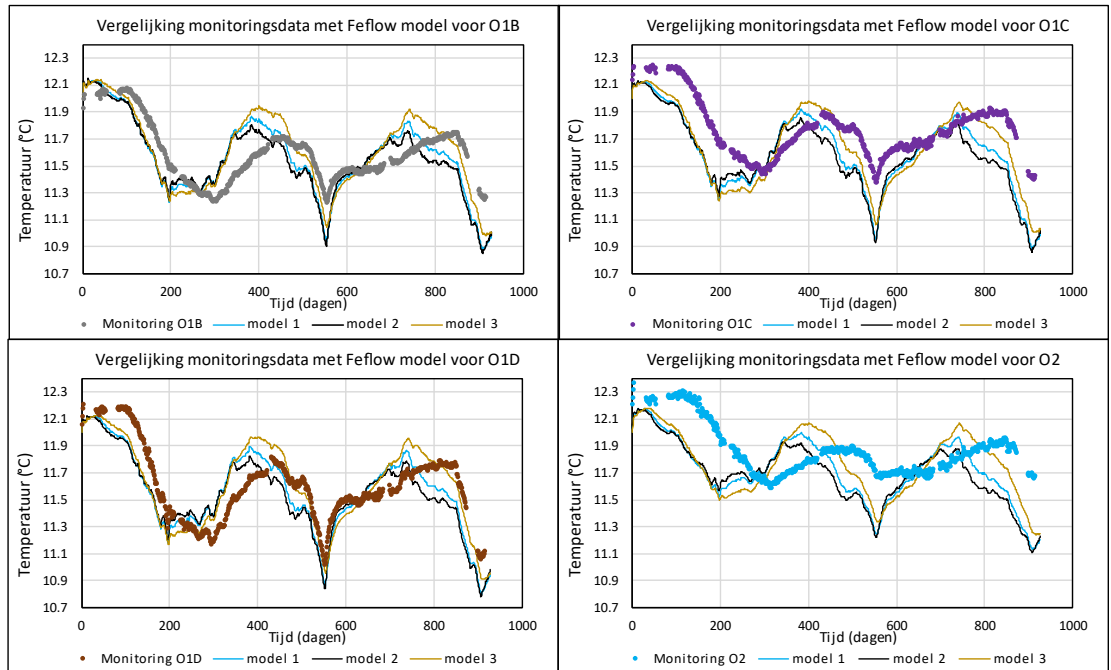
Algemeen beeld is dat de gemeten temperatuurverlaging bij alle diepe boorgaten omvangrijker is dan wat er op basis van de Feflow modellen wordt berekend.

Voor de ondiepe observatieboorgaten komen de Feflow resultaten qua orde grootte in alle gevallen overeen met wat er gemeten is. Wel is er in meerdere gevallen sprake van enig verschil in precieze temperatuuramplitude en de exacte momenten waarop bepaalde effecten zichtbaar zijn. Zoals eerder opgemerkt zijn in de monitoringsdata van O1D wat 'heftigere' temperatuur toe- en afnames te zien vergeleken met O1B en O1C. De Feflow modelresultaten hebben wat dat betreft een redelijk goede overeenkomst met O1D, aangezien ook daar (voor alle drie de modellen) sprake is van significante dalen en pieken. Het verschil is voornamelijk goed te zien bij de relatief korte afkoelingspiek rond dag 550. In de Feflow modellen is deze overal te zien, maar in de gemonitorde data is de temperatuurafname in O1D ca. 0,2 K groter dan in O1C en O1D.

Een afwijking van de timing van de pieken en dalen is goed te zien in de resultaten voor O2. Alle drie de Feflow modellen lopen hier ca. 100 dagen voor wat betreft de maxima en minima qua bodemtemperatuur, ten opzichte van de gemeten data. Daarnaast is bij O2 ook de amplitude van de seizoensmatige effecten veel minder duidelijk zichtbaar in de gemonitorde data vergeleken met wat de Feflow modellen berekenen.



Figuur K-3. Vergelijking resultaten verschillende Feflow modellen met gemeten data voor alle diepe observatieboorgaten. Alle weergegeven temperaturen zijn gemiddelden voor de trajecten 20 – 130 m -mv. Legenda voor modellen 1, 2, en 3 is rechtsonder gegeven. wgc= warmtegeleidingscoëfficiënt, w_cap=warmtecapaciteit bodem



Figuur K-4. Vergelijking resultaten verschillende Feflow modellen met gemeten data voor alle ondiepe observatieboorgaten. Alle weergegeven temperaturen zijn gemiddelden voor de trajecten 15 – 20 m -mv. Voor legenda voor de Feflow modellen zie Figuur K3.

K.4 Discussie Feflow modellen

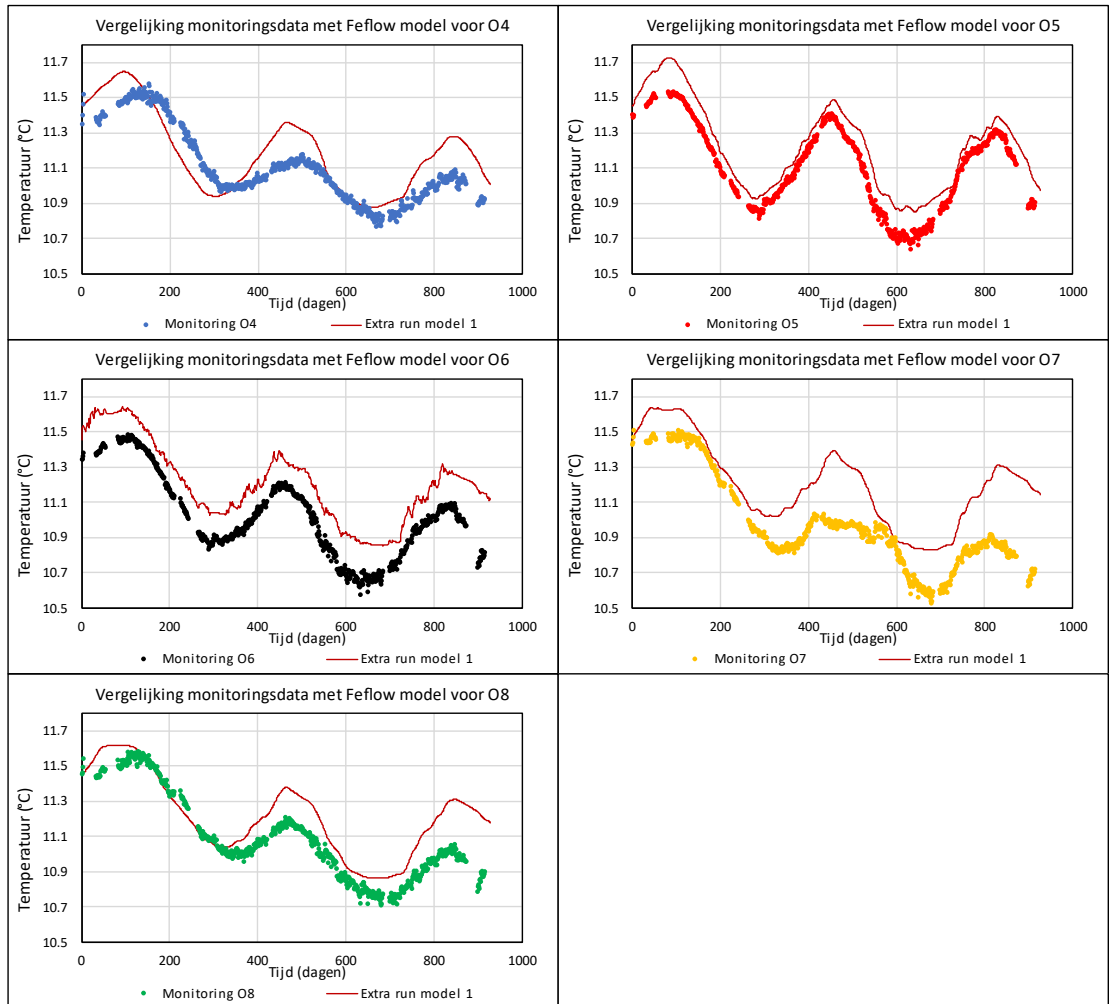
K.4.1 Vergelijking Feflow modellering en gemeten data diepe observatieboorgaten

Uit de Feflow modellen blijken wisselende overeenkomsten tussen gemodelleerde temperatuurontwikkelingen en de gemeten data. De overeenkomsten zijn het grootst bij O5 en het kleinst bij O7. Een blik op de eerder getoonde kaart met alle bronlocaties (Figuur 3-2 en Figuur K-5) kan hier echter een verklaring voor geven. Het valt namelijk te verwachten dat de overige (niet gemonitorde) bodemwarmtewisselaars ook een effect hebben op de observatieboorgaten, met name later in de monitoringsperiode. O5 is het boorgat wat het verst weg is gelegen van niet gemonitorde bodemwarmtewisselaars. O7 ligt juist relatief dichtbij een niet gemonitorde wisselaar. De grote afwijking tussen de Feflow modellen en de gemeten data bij O7, maar ook O6 en O8 kunnen dus relatief simpel verklaard worden door het gegeven dat de overige 43 bodemwarmtewisselaars uit het gehele project ook actief zijn geweest tijdens de monitoringsperiode, maar niet 'aan zijn gezet' in de Feflow modellen. Om het effect hiervan kwalitatief te testen, is een extra scenario van model 1 in Feflow gedraaid waarbij de knooppunten overeenkomend met enkele van de dichtstbij liggende niet gemonitorde bodemwarmtewisselaars (zie Figuur K5), dezelfde temperatuurforcering hebben gekregen als BL2. Aangezien er van deze wisselaars geen deviatieingen beschikbaar zijn, zijn de knooppuntrajecten van deze wisselaars allemaal recht naar beneden in het model geïmplementeerd.



Figuur K-5. Bovenaanzicht met oppervlaktelocaties gemonitorde bodemwarmtewisselaars (rode stippen), niet gemonitorde bodemwarmtewisselaars (zwarte stippen), en observatieboorgaten (blauwe stippen). De zwarte lijnen geven een indicatie van het 3D verloop van de boortrajecten van de boorgaten waar deviatiemetingen zijn uitgevoerd. In de initiële Feflow modellen waren alleen de gemonitorde bodemwarmtewisselaars 'actief'. De groene cirkels geven aan welke bodemwarmtewisselaars 'actief' zijn gemaakt tijdens de extra simulatie voor model 1

Figuur K-6 geeft de resultaten van deze extra analyse. De temperaturen in de observatieboorgaten O6, O7 en O8 laten nu een veel duidelijkere invloed zien veroorzaakt door omliggende bodemwarmtewisselaars. Qua absolute temperatuurafname zitten er nog wel enkele tienden tussen de waarnemingen en de modelresultaten. Dit is echter te verklaren op basis van het feit dat er waarschijnlijk significante verschillen gezeten hebben in de energievragen van de verschillende appartementen aan de verschillende bodemwarmtewisselaars (zie ook Figuren in Bijlage G).



Figuur K-6. Vergelijking resultaten extra Feflow simulatie voor model 1 met gemeten data voor alle diepe observatieboorgaten. Alle weergegeven temperaturen zijn gemiddelden voor de trajecten 20 – 130 m -mv.

Over het geheel gezien maakt de onzekerheid met betrekking tot de invloed van de andere bodemwarmtewisselaars het lastig om directe conclusies te trekken. Voor wat betreft de validiteit van de gekozen bodemparameters lijkt een hogere warmtegeleiding zoals gemeten in de TRT wel iets betere resultaten op te leveren, maar de invloed van het veranderen van de warmtegeleidingscoëfficiënt op een tijdschaal van ca. 2,5 jaar blijkt relatief klein, ten opzichte enkele andere onzekerheden.

Het feit dat de resultaten uit de modellen, zonder inachtnaeme grondwaterstroming, in ieder geval voor observatieboorgat O5 duidelijke overeenkomsten tonen met de gemeten data, is wel een goede indicatie dat modellen die alleen uitgaan van warmtetransport door geleiding in staat zijn om thermische interacties in de bodem op lange termijn adequaat in te schatten, mits de gehanteerde invoerparameters van de berekening ook kloppen.

K.4.2 Vergelijking Feflow modellering en gemeten data ondiepe observatieboorgaten

In de resultaten met betrekking tot de ondiepe observatieboorgaten is het met name opvallend dat er verschillen zitten in de momenten waarop seizoenale pieken plaatsvinden tussen de gemeten data en de modelresultaten. Dit zou eventueel verklaard kunnen worden door lokale heterogeniteit van de bodem, en daarmee ook de thermische parameters. De resultaten van de TRT geven enkel gemiddelde waarden voor het gehele traject van de wisselaars. Uniforme parameters zijn ook meegenomen binnen de Feflow modellen. Het is goed mogelijk dat de

warmtegeleidingscoëfficiënt in werkelijkheid in de bovenste 20 meter van de ondergrond lager ligt dan op grotere diepte.

De afwijkingen in timing kunnen ook verklaard worden door laterale heterogeniteit van de bodemopbouw. De aanwezigheid van lokale meer kleiige afzettingen kan ervoor zorgen dat de energieoverdracht direct naast de wisselaar niet geheel radiaal plaatsvindt. Dit kan wellicht ook het verschil in temperatuurontwikkeling tussen O1D en O1B & O1C verklaren. Gezien de schaalgrootte waar hier gekeken wordt (afstanden ca. 1m tot wisselaar) kunnen de verschillen ook nog verklaard worden door onzekerheden in de opzet van de monitoringsinfrastructuur. De boorgaten zijn allen ca. 0,15 m in diameter, als de glasvezelkabel in een observatieboorgat enigszins scheef is ingebracht in de richting van de bodemwarmtewisselaar, kan een heftigere temperatuurrepons verwacht worden dan in een boorgat waar de glasvezelkabel overwegend scheef is ingebracht in de richting weg van de bodemwarmtewisselaar.

K.5 Opzet FLS modellering

Naast de analyse van interferentie met het Feflow model is ook een analyse uitgevoerd met het standaard model toegepast voor het bepalen van interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen (ITGBES-PRO, gebaseerd op de eindige lijnbronmethode). Het model ITGBES-PRO is ook het model waarmee de vereenvoudigde methode, geïmplementeerd in een excel-spreadsheet, ITGBES wat in Nederland als onderdeel van SIKB protocol 8200 beschikbaar wordt gesteld voor het bepalen van negatieve interferentie tussen gesloten bodemenergiesystemen.

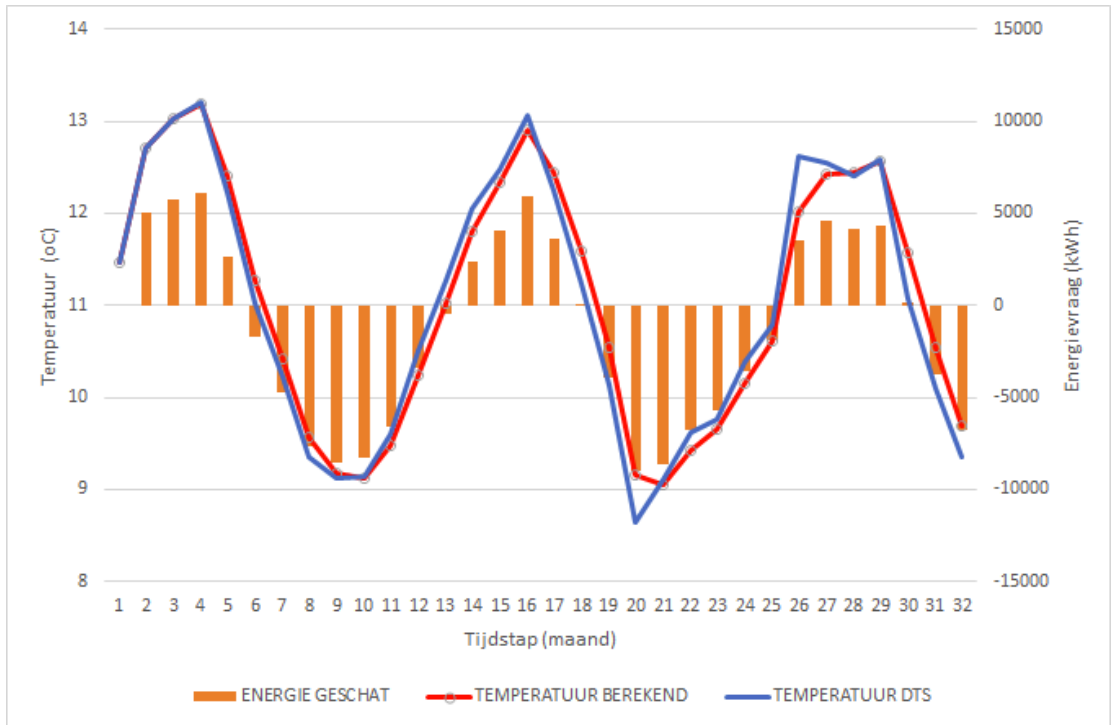
Omdat er geen koppeling gelegd kan worden tussen het bovengrondse monitoringsysteem en het ondergrondse monitoringsysteem is ook hier een oplossing op basis van een parameter-schattings methode geïmplementeerd. Anders dan bij Feflow, waar het model direct met temperatuurwaarnemingen geforceerd kan worden, wordt bij dit model de temperatuur in het boorgat en op afstand van het boorgat berekend op basis van een energievraagpatroon.

Aangezien dit energievraagpatroon niet gemeten is, moet het worden ingeschat. Dit is uitgevoerd door een parameter-schattingsmethode (hooke-jeeves) waarbij de fout tussen berekende en gemeten temperatuur in het boorgat geminimaliseerd wordt. Deze parameterschatting wordt sequentieel voor elke tijdstap in de tijdreeks uitgevoerd. Als tijdstap is gekozen voor een maand (730 uur), in totaal zijn 26 maanden uit de monitoringreeks geanalyseerd.

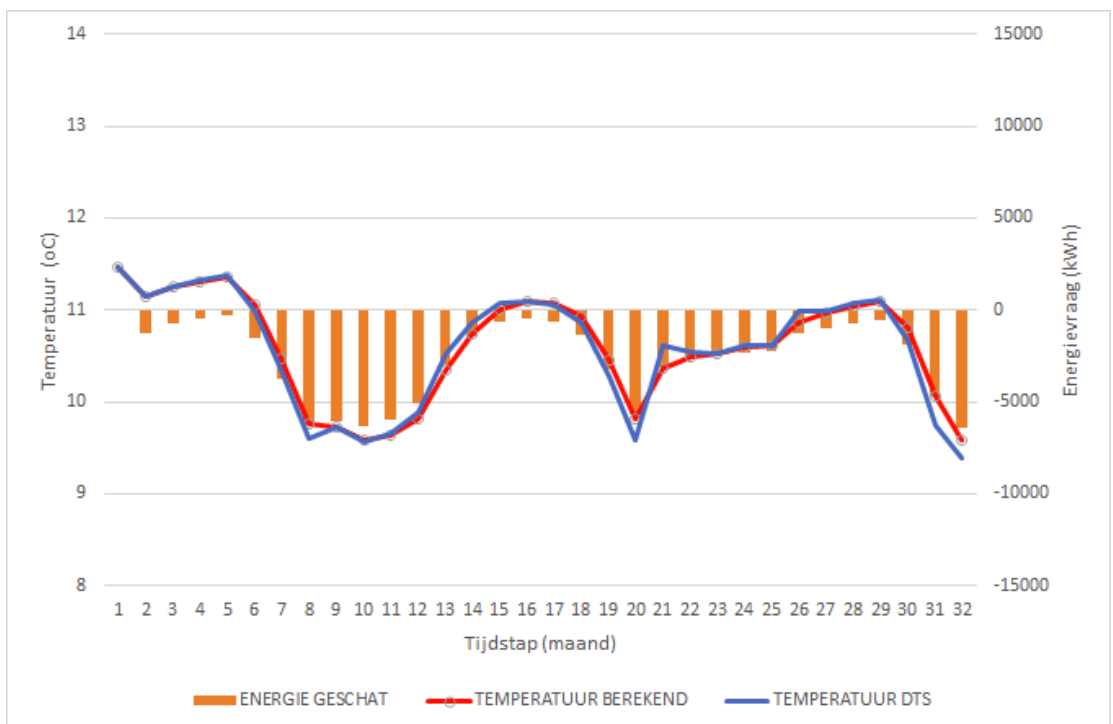
Nadat het energievraagprofiel geschat is worden de temperatuureffecten op afstand (observatiepunten) berekend. Deze worden vergeleken met de gemeten temperatuureffecten van de observatiepunten.

K.6 Resultaten FLS modellering

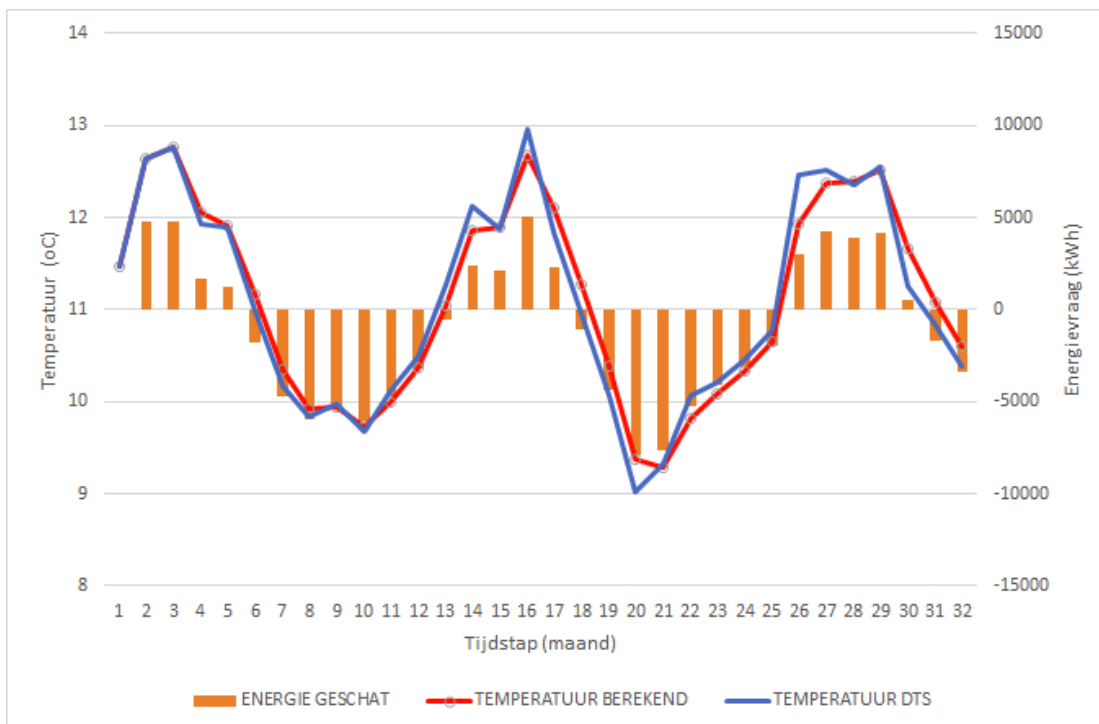
In alle gevallen is er een goede overeenkomst tussen de gemeten en berekende temperatuur. Opvallend is dat boring 35A een kleiner temperatuureffect te zien geeft (omdat hier twee boringen tot 100 meter elk zijn gerealiseerd in plaats van 1 boring tot 130 meter).



Figuur K-7. Boring 29: Resultaten parameterschatting: gemeten en berekende temperatuur, energievraagpatroon.



Figuur K-8. Boring 35A: Resultaten parameterschatting: gemeten en berekende temperatuur, energievraagpatroon.



Figuur K-9. Boring 36: Resultaten parameterschatting: gemeten en berekende temperatuur, energievraagpatroon.

Met de op deze wijze samengestelde energievraagpatronen is vervolgens de temperatuurverandering op de waarnemingspunten berekend. Omdat de afstand tussen de punten uiteraard bepalend is, en de afstand door de afwijkingen van de boringen met de verticaal, niet constant is met de diepte zijn voor de verschillende diepte-intervallen aparte berekeningen uitgevoerd. Niet alle mogelijke diepte intervallen zijn doorgerekend, voor de ondiepe waarnemingspunten is op diepte-interval 20 – 30 meter –mv gekeken (waar geen effect van oppervlaktetemperatuur optreedt), voor de verder weggelegen waarnemingspunten is op grotere diepte (± 130 meter – mv) de berekening uitgevoerd.

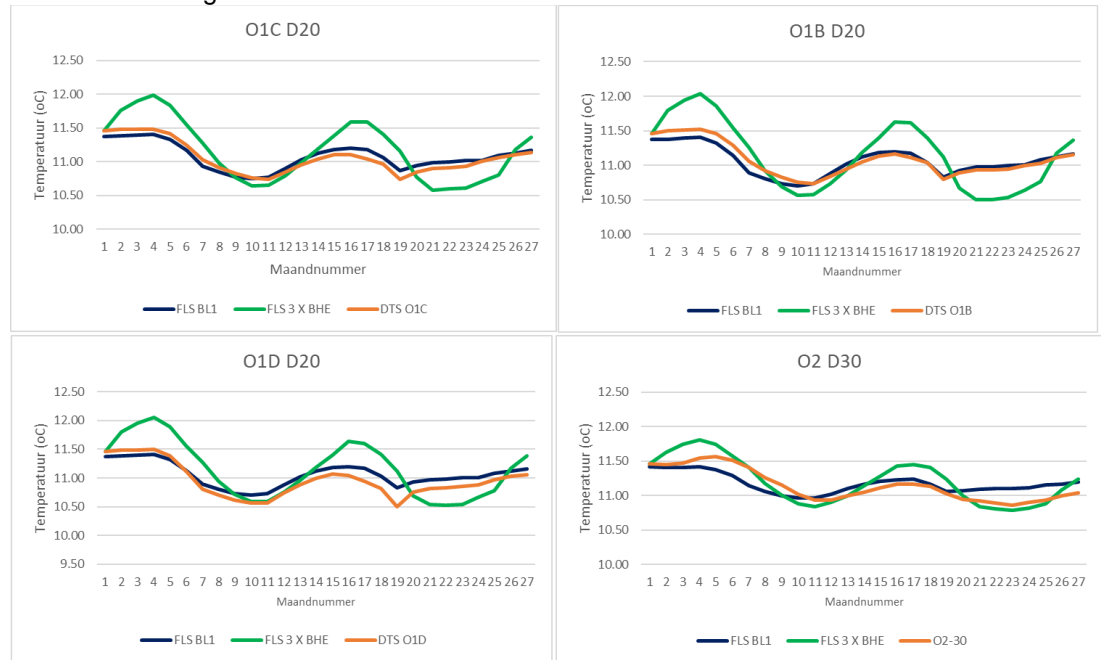
Tabel-7 geeft de afstanden tussen de verschillende bodemwarmtewisselaars en waarnemingspunten weer.

Tabel -7 In deze tabel worden de afstanden gegeven tussen de verschillende bodemwarmtewisselaars en waarnemingspunten.

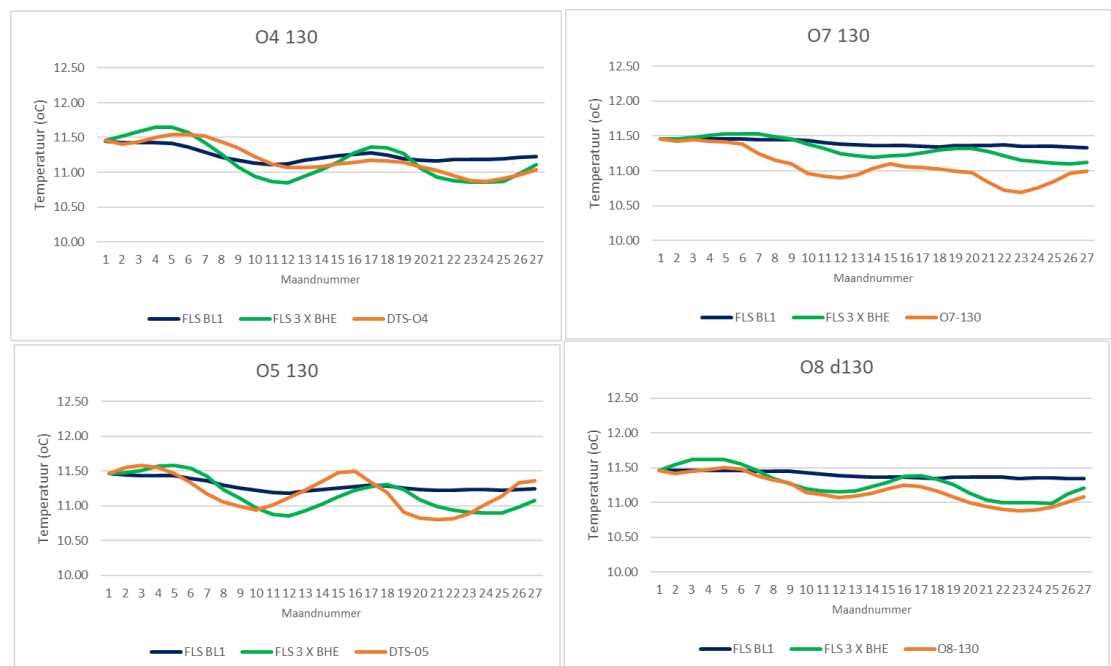
	29	35A	35B	36	O1B	O1C	O1D	O2	O4	O5	O6	O7	O8
29	0.0	6.5	22.1	12.1	5.5	6.2	6.7	5.8	3.6	2.7	5.8	8.3	11.0
35a	6.5	0.0	22.9	8.4	1.0	1.1	1.0	1.9	3.0	3.9	7.5	8.9	8.9
35b	22.1	22.9	0.0	16.6	22.5	23.8	22.0	24.3	21.8	22.6	16.5	14.3	14.5
36	12.1	8.4	16.6	0.0	8.6	9.5	7.4	10.3	9.3	10.6	8.0	6.6	2.7
O1b	5.5	1.0	22.5	8.6	0.0	1.4	1.4	1.8	2.0	2.9	6.8	8.3	8.8
O1c	6.2	1.1	23.8	9.5	1.4	0.0	2.1	0.8	3.0	3.5	8.1	9.7	10.0
O1d	6.7	1.0	22.0	7.4	1.4	2.1	0.0	2.9	3.2	4.3	7.0	8.1	7.9
O2	5.8	1.9	24.3	10.3	1.8	0.8	2.9	0.0	3.0	3.2	8.4	10.1	10.6
O4	3.6	3.0	21.8	9.3	2.0	3.0	3.2	3.0	0.0	1.3	5.5	7.5	8.9
O5	2.7	3.9	22.6	10.6	2.9	3.5	4.3	3.2	1.3	0.0	6.2	8.4	10.1
O6	5.8	7.5	16.5	8.0	6.8	8.1	7.0	8.4	5.5	6.2	0.0	2.5	6.0
O7	8.3	8.9	14.3	6.6	8.3	9.7	8.1	10.1	7.5	8.4	2.5	0.0	4.2
O8	11.0	8.9	14.5	2.7	8.8	10.0	7.9	10.6	8.9	10.1	6.0	4.2	0.0

Het totaalbeeld (figuur K-10, K-11) is vergelijkbaar met de Feflow analyse, het is nodig om alle bodemwarmtewisselaars “aan” te zetten om een overeenkomst met de metingen te

krijgen, alhoewel de temperatuurverandering van de nabije waarnemingspunten nog onderschat wordt. Bij de verder weg gelegen waarnemingspunten is er ook sprake van enige fase-verschuiving.



Figuur K-10. Ondiepe, nabije waarnemingspunten: vergelijking tussen DTS temperatuurmetingen en JLS berekening met een bodemwarmtewisselaar "aan" en drie bodemwarmtewisselaars "aan".



Figuur K-11. Diepe, verder weggelegen waarnemingspunten: vergelijking tussen DTS temperatuurmetingen en JLS berekening met een bodemwarmtewisselaar "aan" en drie bodemwarmtewisselaars "aan".

K.7 Discussie FLS modellering

De FLS berekeningen en vergelijking met de DTS data laten een redelijk goede overeenkomst zien. Omdat het energievraagpatroon in dit geval geschat is en niet gemeten en het boorgat met de nabije waarnemingspunten de kleinste energievraag heeft is de mogelijke onzekerheid relatief groot en is het daarmee moeilijk kwantitatieve uitspraken te doen.

K.8 Conclusies

Onderstaand worden de belangrijkste conclusies van de analyses samengevat:

Feflow:

- Er blijkt een vrij groot verschil tussen de metingen en de modelberekeningen met alleen de invloed van de gemonitorde bodemwarmtewisselaars. Er is gekeken of dit verklaard kan worden door afwijkingen in thermische bodemparameters, dit lijkt niet het geval: de beste overeenkomst wordt gevonden door de thermische bodemparameters zoals bepaald bij de TRT's. Ook is te zien dat bij een aantal waarnemingspunten de overeenkomst gedurende de eerste 200 – 300 dagen vrij goed is, daarna divergeren de uitkomsten. Dit lijkt een indicatie van invloed door andere, niet gemonitorde, bodemwarmtewisselaars. Door een aantal nabijgelegen niet-gemonitorde bodemwarmtewisselaars te activeren wordt een betere overeenkomst gevonden. Hieruit kan geconcludeerd worden dat a) geleiding het overheersende proces van warmteoverdracht is en b) thermische interacties tussen de individuele bodemwarmtewisselaars als gevolg van de hoger warmtegeleidingscoëfficiënt groter is dan aanvankelijk gedacht.
- Het feit dat de resultaten uit de modellen, zonder grondwaterstroming, duidelijke overeenkomsten tonen met de gemeten data, is een goede indicatie dat modellen die alleen uitgaan van warmtetransport door geleiding in staat zijn om thermische interacties in de bodem op lange termijn adequaat in te schatten, mits de gehanteerde invoerparameters van de berekening ook kloppen.

ITGBES-PRO:

- De vergelijking tussen de gemeten temperatuurontwikkeling en de met het eindige lijnbronmodel (ITGBES-PRO) berekende temperatuurverandering zijn, gezien de onzekerheden in energievraagpatroon, goed. Verschil tussen berekende en gemeten temperaturen bedraagt $\pm 0,5K$. Een groot deel van die verschillen komt voort uit een overschatting van de koelvraag (die niet gemeten is) en verschil in fase.
- Globale trend van afkoeling door warmte-onttrekking wordt door de FSL methode goed voorspeld.
- Het ontbreken van de koppeling gemonitorde energievragen en gemonitorde bodemwarmtewisselaars, in combinatie met de onzekerheden met betrekking tot de invloed de overige bodemwarmtewisselaars (zowel qua energievraag, als qua deviatie van de boortrajecten), maakt het moeilijk om kwantitatief verder duidelijke conclusies te trekken.

L Gevoeligheid ontwerpmethodes voor variaties in uitgangspunten: implicaties voor ontwerppraktijk

L.1 Ontwerp van geclusterde individuele GBES in de praktijk

Bij het in samenhang ontwerpen van clusters van individuele gesloten bodemenergiesystemen zijn er meerdere mogelijkheden voor het ontwerpproces.

De beschikbare standaard ontwerpmethodes voor gesloten bodemenergiesystemen (EED) berekend het thermische gedrag van het BES als een collectief systeem. Dat wil zeggen dat elke bodemwarmtewisselaar dezelfde aanvoertemperatuur heeft en de energetische bijdrage van centrale warmtewisselaars (met relatief meer burens) kleiner kan zijn dan warmtewisselaars aan de periferie, die minder invloed van burens ondervinden. Veelal worden clusters van individuele bodemwarmtewisselaars ook als collectief systeem ontworpen. Dan is echter niet de temperatuur overal gelijk en het vermogen per warmtewisselaar afhankelijk van de positie, dan is het vermogen afhankelijk van de vraag van het gebouw waar die warmtewisselaar aan gekoppeld is. Feitelijk moet voor elk individueel systeem een apart ontwerp opgesteld worden waarbij rekening gehouden wordt met de temperatuureffecten van omliggende systemen met een andere energievraag. Dat kan in principe niet door EED berekend worden.

In de gevoeligheidsanalyse worden onder andere de effecten van de verschillende mogelijke ontwerpmethodes beschouwd. Hieronder kort een toelichting op de belangrijkste ontwerpmethodes die in de praktijk worden toegepast:

- **Methode A:** Collectief ontwerp: energievraag van alle individuele systemen wordt voor het ontwerp van geclusterde individuele systemen opgesteld in EED (of vergelijkbare ontwerptool). Bij de berekening met EED betreft het dus altijd een 'collectieve berekening': alle bodemwarmtewisselaars krijgen dezelfde lengte, op basis van gemiddelde energie-uitwisseling met de bodem op basis van de totale energievraag. Hierbij treedt mogelijk over/onder-dimensionering op voor de individuele systemen afhankelijk van hun locatie in het cluster en werkelijke energievraag.
- **Methode B:** Conservatief collectief: ontwerp voor geclusterde individuele systemen in een veld alsof het één gezamenlijk lussenveld betreft (zoals bij methode A). Echter wordt bij deze methode de ontwerp temperatuur verhoogd om rekening te houden met de mogelijke thermische interacties. Hiermee wordt de prestatie van de individuele systemen gewaarborgd. Hierbij treedt mogelijk over-dimensionering op voor de systemen die aan de randen van een cluster worden aangelegd omdat ook daar de ontwerp temperatuur wordt verhoogd.
- **Methode C:** Iteratieve ontwerp berekening voor geclusterde individuele systemen. Voor elk systeem wordt een individueel ontwerp opgesteld en wordt vervolgens voor het hele bodemwarmtewisselaarveld alle interacties berekend. Deze worden bij alle individuele ontwerpen gecompenseerd waardoor de lengtes en daarmee de thermische interacties veranderen. De thermische interacties worden opnieuw berekend, en vervolgens weer nieuwe ontwerp lengtes bepaald. Dit wordt enkele malen herhaald totdat de lengte niet meer verandert.

L.2 Onzekerheden ontwerpuitgangspunten

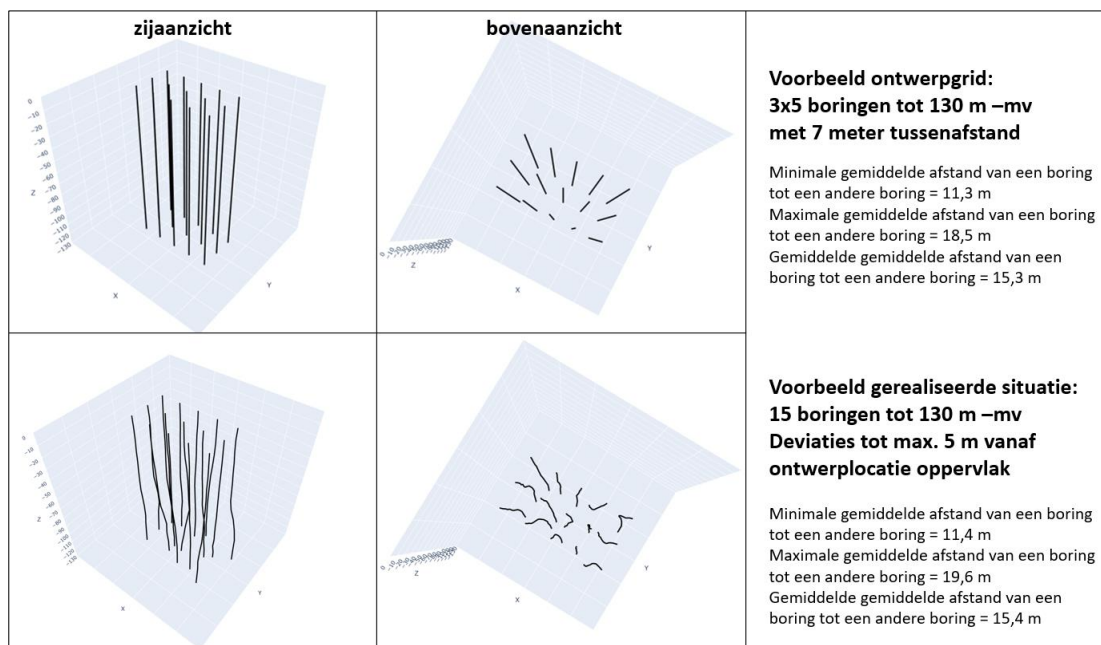
Uit het monitoringproject OPTIGBES blijken belangrijke afwijkingen en variaties van ontwerpparameters ten opzichte van uitgangspunten uit het standaard ontwerp

Hieronder een opsomming van de belangrijkste waarnemingen:

- Lagere initiële gemiddelde bodemtemperatuur over het dieptetraject.
- Hogere gemiddelde warmtegeleiding over dieptetraject.
- Significante declinaties (afwijking verticaal) van boortrajecten met diepte.
- Grote verschillen in energievraag tussen gebruikers, en ten opzichte van de ontwerpwaarden.
- Kleinere pieklast en kortere pieklastduur dan aangemomen bij ontwerp.

Door de declinatie van de boortrajecten zal niet perse een verschil in thermische effecten optreden binnen geclusterde (of collectieve) ontwerpen. Alhoewel boringen die over hun gehele traject dicht bij elkaar komen dan in een ontwerp voorzien elkaar inderdaad meer zullen beïnvloeden, zal in de praktijk over het algemeen een kleinere afstand naar de ene richting gecompenseerd worden door een grotere afstand naar eventuele wisselaars in andere richting. Zeker bij geclusterde systemen zullen de effecten van kleinere en grotere afstanden tot nabijgelegen wisselaars elkaar grotendeels opheffen. Figuur L-1 geeft een willekeurige voorbeeldsituatie voor een bronnenveld van 3 x 5 warmtewisselaars. De afwijkingen tov d verticaal in de 'gerealiseerde' situatie zijn hierbij gebaseerd op de bevindingen uit het OPTIGBES-project (max. 5 m deviatie tot 130 m -mv). Zoals te zien, is er vrijwel geen verschil in de uiteindelijke gemiddelde afstanden van een boring tot de andere boringen.

De kans dat twee boortrajecten elkaar raken blijft natuurlijk wel altijd aanwezig, en de mogelijkheid daartoe zou zoveel mogelijk beperkt moeten worden door het meenemen van adequate tussenafstanden binnen een ontwerp. Gemiddelde genomen zullen deviaties van boortrajecten echter niet snel een significante invloed hebben op het lange termijn thermisch functioneren van de bodemwarmtewisselaars.



Figuur L-1. Voorbeelduitwerking van invloed deviaties boortraject op onderlinge afstanden en thermisch gedrag van bodemwarmtewisselaars in nauw geclusterd bronnenveld.

De afwijking van de boortrajecten is dus wel belangrijk, maar er wordt verwacht dat dit gemiddeld geen effect heeft op het thermische ontwerp van geclusterde individuele systemen. De overige drie parameters zullen voor alle drie de in de vorige paragraaf besproken methodes wel invloed kunnen hebben op de resultaten voor ontwerpberoeeningen op de lange termijn. Enkele analyses worden daarom uitgevoerd om de schaal van de afname of toename in boormeters inzichtelijk te maken. Dit wordt gedaan met behulp van collectieve EED berekeningen, representatief voor 'methode A' en 'methode B', en ook voor iteratieve ontwerpberoeeningen uitgevoerd conform 'methode C'. Alle analyses gebruiken een geometrie overeenkomstig met of afgeleid van de projectlocatie te Hoogezand.

L.3 Doel analyse

Een GBES is ontworpen om gedurende de hele levensduur van het gebouw de warmte- en koude te leveren op het gewenste rendement. De levensduur is in Nederland voor een gebouw gesteld op 50 jaar. Binnen het ontwerpproces wordt de omvang (aantal en diepte van de bodemwarmtewisselaars) bepaald door berekening van de vloeistoftemperaturen over een lange periode (voor een enkele bodemwarmtewisselaar is er na 25 jaar sprake van een evenwichtstoestand: de temperatuur verandert dan niet meer).

Het doel van de analyse in deze paragraaf is om inzichtelijk te maken hoe het ontwerpproces van GBES geoptimaliseerd kan worden, afhankelijk van de gemeten variatie aan gebruikscondities en bodemeigenschappen.

Op basis van de bevindingen uit deze analyse worden vervolgens enkele algemene lessen voor het ontwerp van vergelijkbare systemen in kaart gebracht en samengevat.

L.4 Methode

L.4.1 Earth Energy Designer berekeningen

Earth Energy Designer (EED) is een programma waarmee de gemiddelde vloeistoftemperatuur van een verticale bodemwarmtewisselaar wordt berekend o.b.v. verschillende factoren zoals eigenschappen van het boorgat, het type circulatievloeistof, de eigenschappen van de bodem en de benodigde warmte- en koudevraag die met de wisselaar uit de bodem worden onttrokken. Dit kan berekend worden voor een enkele verticale boring, of voor meerdere aan elkaar gekoppelde verticale boringen. EED berekent dus altijd één gemiddelde vloeistoftemperatuur.

Belangrijk: EED neemt alleen warmtetransport mee door conductie (warmtegeleiding). Het potentiële effect van advectie (warmtetransport door grondwaterstroming) wordt dus niet meegenomen. Binnen de huidige analyse zijn de eigenschappen van de wisselaars (o.a. diameter boorgat, type wisselaar, afstand tussen opgaande en neergaande leiding, warmtegeleiding aanvulmateriaal, warmtegeleiding leiding) gelijk aan de eigenschappen van de wisselaars van de systemen uit het project in Hoogezand (zie Figuur L2).

Figuur L-2. Invoerparameters collectieve EED berekeningen.

L.4.2 Collectieve berekening (Methode A)

De collectieve berekeningen zijn uitgevoerd voor 48 boringen in een rechthoek van 4 bij 12 met 7,5m afstand tussen de boringen (Figuur L3a). Deze opstelling is gebruikt om een qua grootte en vorm vergelijkbaar systeem te krijgen als het systeem gerealiseerd in Hoogezand. Voor dit totale veld kan vervolgens de minimaal benodigde boordiepte worden berekend waarbij het systeem na 30 jaar nog steeds voldoet aan de eis met betrekking tot de gekozen minimale vloeistoftemperatuur (0 °C in dit geval). De benodigde boordiepte is voor het collectieve systeem voor 3 energieprofielen doorgerekend (Tabel-8). Deze profielen zijn gekozen o.b.v. de gemeten energieprofielvariatie bij de GBES in Hoogezand. De aanname hier is dat alle appartementen hetzelfde energieprofiel hebben wat voor het totale systeem leidt tot een netto warmteonttrekking van 89,0 MWh/J (scenario -50%) of 267,0 MWh/J (scenario +50%).

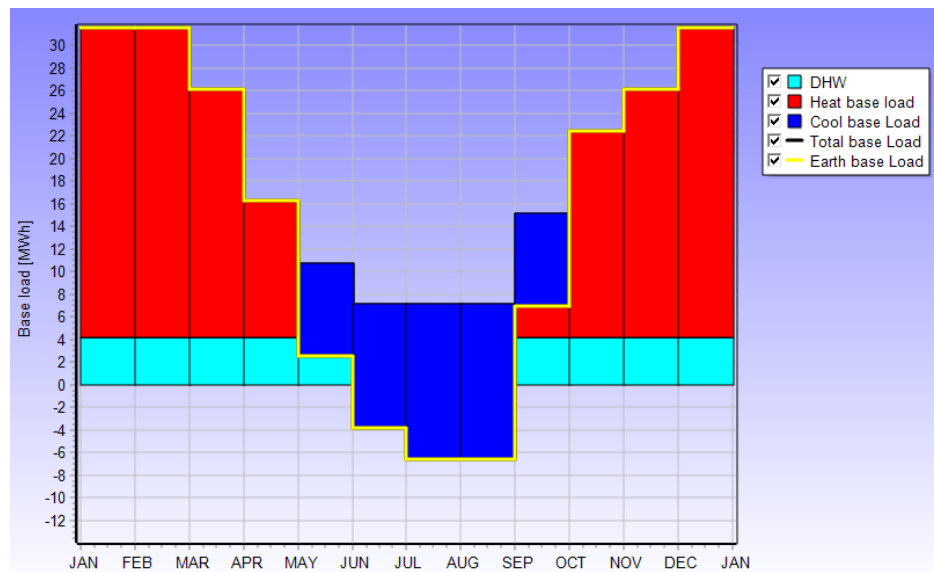
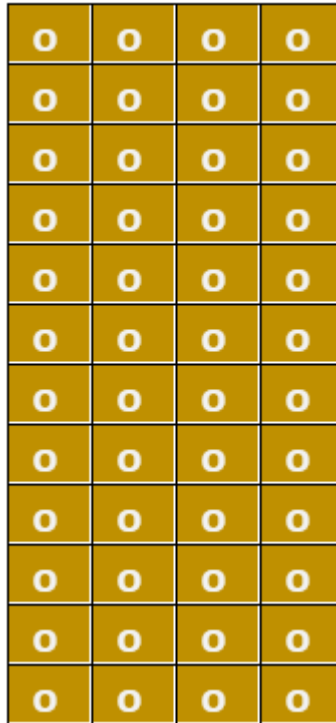
Tabel-8. Gebruikte energieprofielen collectieve EED berekeningen.

Energieprofiel	Ruimteverwarming (MWh/J)	Tapwater (MWh/J)	Ruimtekoeling (MWh/J)	Netto (MWh/J)
Standaard	182,6	50,1	54,7	178,0
-50% netto warmteonttrekking	91,3	25,1	27,4	89,0
+50% netto warmteonttrekking	273,9	75,2	82,1	267,0

Tabel-9. Overzicht scenario's collectieve EED berekeningen.

Afstand tussen boringen (m)	Warmtegeleidingscoëfficiënt (W/mK)
5	2
7,5	2,65
10	3,3

<-> 7.5m



Figuur L-3. (A) Representatie van de (vereenvoudigde) geometrie gehanteerd voor het voorbeeldsysteem binnen de collectieve berekeningen. (B) Gebruikte totale standaard energievraagpatroon gehanteerd voor het voorbeeldsysteem, gebaseerd op het ontwerp in Hoogezand.

L.4.3 Berekening prestaties enkel systeem (input voor ITGBES-PRO; methode C)

Om de benodigde boordiepte te berekenen voor iedere individueel systeem op basis van de relatieve positie van de boring (iteratieve ontwerp methode C) is een dataset nodig van de prestaties van de individuele systeemontwerpen voor variërende boordieptes (zonder inachtneming effecten omliggende systemen). Deze individuele systeemontwerpen zijn uitgevoerd met EED, echter, bij deze berekeningen is niet de minimale boordiepte berekend maar de resulterende vloeistoftemperatuur na 30 jaar voor een boordiepte van 50, 90, 130 of 170 meter.

L.4.4 Opzet iteratieve clusterberekeningen ITGBES-PRO (methode C)

Om binnen een cluster systemen voor ieder individueel GBES apart de benodigde boormeters te kunnen bepalen, is een iteratieve procedure toegepast. Op basis van de relatieve positie van een individueel systeem binnen het cluster zal een groter of kleiner temperatuureffect zijn van omliggende systemen. Voor ieder systeem dient de ontwerp berekening gecompenseerd te worden voor de temperatuureffecten van de omliggende systemen.

De hier gehanteerde iteratieve ontwerp procedure is gebaseerd op twee rekenmodulen, en is als volgt:

1. De noodzakelijke boordiepte van ieder GBES wordt berekend met behulp van het 'reguliere' rekenprogramma EED, op basis van de energievraag, specificaties van de gekozen wisselaar(s) en de eigenschappen van de bodem.
2. Met de individuele lengtes voor ieder systeem berekend in stap 1, worden de onderlinge temperatuureffecten tussen alle GBES in het cluster berekend met het door Groenholland ontwikkelde rekenprogramma ITGBES-PRO.
3. Indien nodig, wordt per systeem de in stap 1 in EED gehanteerde ontwerp temperatuur (de minimale of maximale temperatuur die in het systeem mag optreden en waarbij het rendement gegarandeerd wordt), aangepast op basis van de in stap 2 bepaalde temperatuureffecten veroorzaakt door omliggende systemen. Hiermee wordt een nieuwe lengte berekend waarbij rekening gehouden is met de temperatuureffecten van omliggende systemen.
4. Deze aangepaste ontwerp lengtes worden vervolgens weer in stap 2 ingevoerd en nieuwe onderlinge temperatuureffecten worden bepaald.
5. Dit proces wordt herhaald totdat de verandering van lengte (of van temperatuureffect) ten opzichte van de vorige iteratie klein genoeg is, men spreekt dan van convergentie. Als convergentie criterium is bv 5% of 10% verandering gebruikelijk.

Om de effecten van de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem en de energievragen van de appartementen inzichtelijk te maken, worden meerdere scenario's doorgerekend. Op basis van de in Bijlage G gepresenteerde monitoringsresultaten zijn enkele energieprofielen gedefinieerd, zie Tabel-10. Daarnaast worden drie verschillende warmtegeleidingscoëfficiënten, welke vallen binnen het bereik tussen de initiële ontwerp waarde en de maximaal gemeten TRT-waarde, meegenomen binnen de berekeningen. Tabel-11 geeft een overzicht van alle te beschouwen scenario's.

Tabel-10. Overzicht verschillende energievraagpatronen clusterberekeningen.

Energieprofiel	Jaarlijkse bodemzijdige warmtevraag (MWh)	Jaarlijkse bodemzijdige koudevraag (MWh)
Ontwerp	5,1	1,2
Minimale belasting bodem	1,6	0,9
Maximale belasting bodem	8,6	0,1
Gemiddeld	4,0	0,6
Extra	3,0	1,0

Tabel-11. Overzicht verschillende scenario's met combinaties energievragen en warmtegeleidingscoëfficiënten voor clusterberekeningen.

Scenario	Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (W/mK)	Energieprofiel	Verdeling energieprofielen
1	2,00	Ontwerp	Uniform
2	2,65	Ontwerp	Uniform
3	3,30	Ontwerp	Uniform
4	2,00	Minimaal	Uniform
5	2,65	Minimaal	Uniform
6	3,30	Minimaal	Uniform
7	2,00	Maximaal	Uniform
8	2,65	Maximaal	Uniform
9	3,30	Maximaal	Uniform
10	2,00	Gemiddeld	Uniform
11	2,65	Gemiddeld	Uniform
12	3,30	Gemiddeld	Uniform
13 (25x)	2,65	Alle	Wisselend

Aan de hand van de gekozen energieprofielen en warmtegeleidingscoëfficiënten worden ontwerpberoeeningen uitgevoerd. Voor alle scenario's worden individuele EED berekeningen gemaakt, welke binnen een iteratief proces gecombineerd worden met de met ITGBES-PRO berekende thermische interacties om de benodigde boordiepte voor ieder systeem te bepalen. Tabel L5 geeft een overzicht van de relevante overige vaststaande parameters gehanteerd binnen de EED berekeningen. Deze zijn ook zo veel mogelijk gebaseerd op de waarnemingen gedaan binnen het OPTIGBES project en de uitgangspunten van het originele ontwerp.

Voor de 'uniforme' scenario's krijgen alle 46 bodemwarmtewisselaarposities dezelfde energievragen. Voor scenario 13 worden de vijf verschillende in Tabel-10 aangegeven energievraagpatronen willekeurig over de bodemwarmtewisselaarsposities verdeeld. Hoe vaak ieder energieprofiel voorkomt staat gegeven in Tabel-11. Deze indeling is zo gekozen dat de totale belasting van de bodem over alle 46 bodemwarmtewisselaarsposities ongeveer gelijk is aan 46x het gemiddelde profiel. Scenario 13 wordt 25x doorgerekend om een duidelijk beeld te krijgen van het bereik van de invloed van wisselende verdelingen van de energievragen binnen een cluster GBES.

Tabel-12 Overzicht overige parameters individuele EED berekeningen ten behoeve van integrale clusterontwerpen.

Parameter	Waarde
Warmtecapaciteit bodem (MJ/m ³ /K)	2,4
Gemiddelde bodemtemperatuur (°C) (geldig voor alle boordieptes)	11,5
Circulatiemedium	Water/glycol
Stromingsregime	Turbulent
Bodemzijdige pieklast (kW)	3,2
Pieklastduur (uur)	6

Tabel-13 Overzicht onderverdeling energievraagpatronen binnen scenario 13.

Energieprofiel	Aantal keer aanwezig binnen cluster
Ontwerp	5
Minimale belasting bodem	7
Maximale belasting bodem	5
Gemiddeld	24
Extra	5

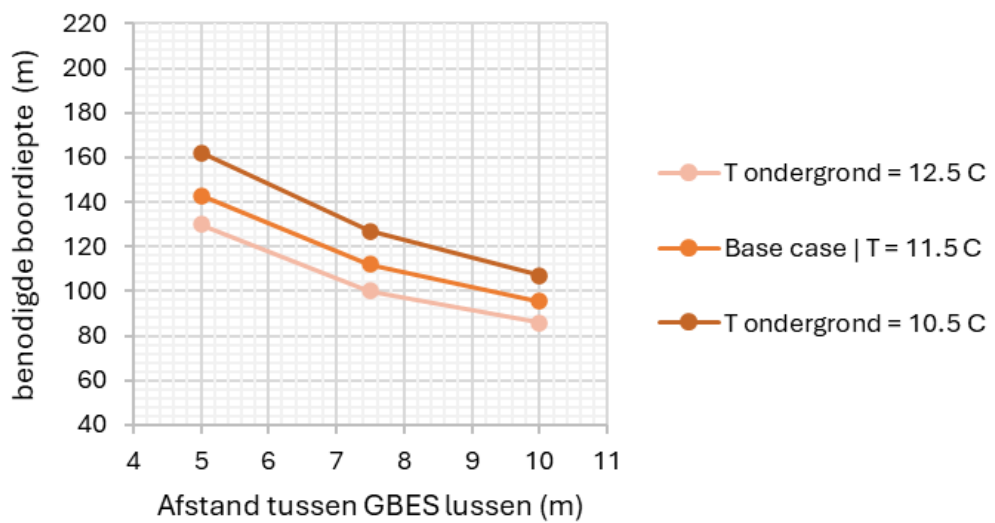
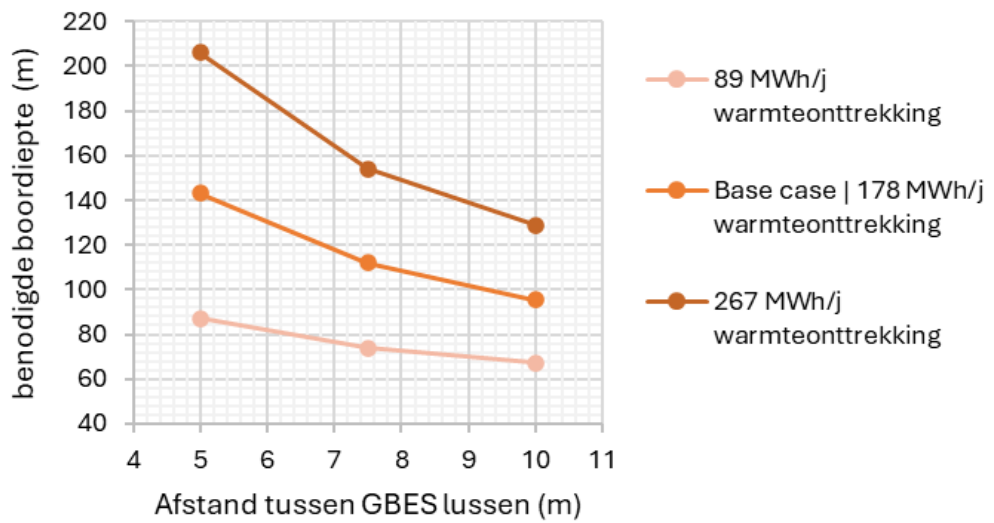
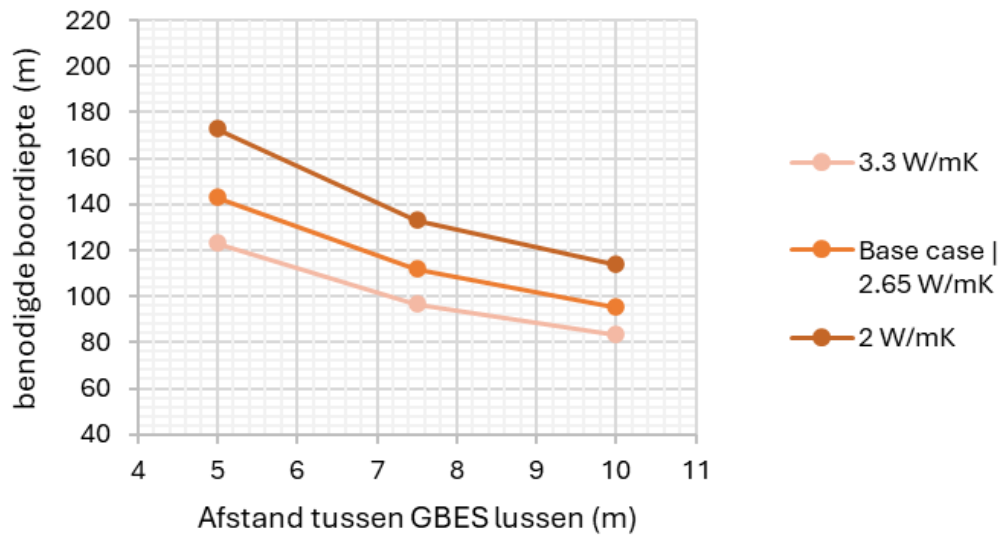
L.5 Resultaten

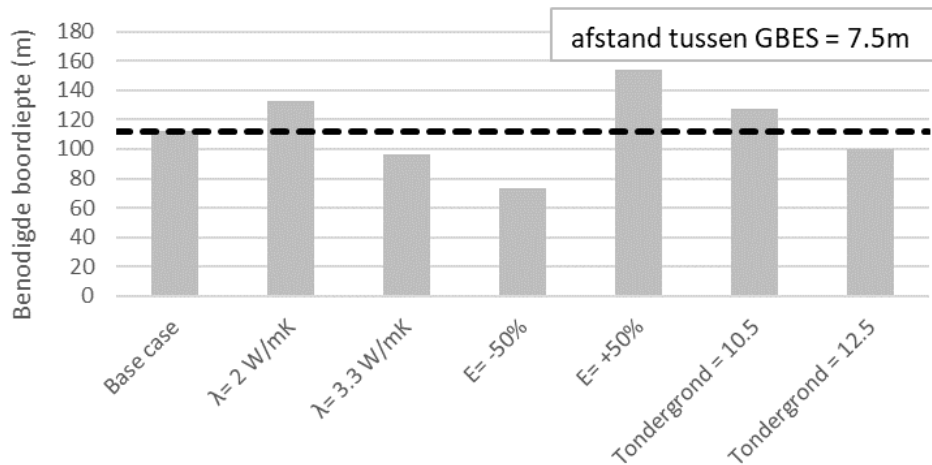
L.5.1 EED berekeningen voor collectief systeem

De benodigde boordiepte neemt af bij grotere afstand tussen de boringen in het veld, en bij hogere warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem. De berekende boordiepte van het GBES varieert tussen 80 en 170 meter (kleine warmtegeleiding, lussen dicht bij elkaar) gegeven afhankelijk van de toegepaste ontwerpparameter variaties.

Voor de gebruikte range aan condities is het effect van de afstand tussen de boringen groter (max. 60m verschil bij $\lambda=2$ W/mK) dan het effect van de warmtegeleidingscoëfficiënt (max. 50m verschil bij plaatsingsafstand van 5m).

Het is duidelijk dat beide parameters een grote invloed hebben op de berekende boordiepte van het GBES. Het effect van een 50% grotere of kleinere netto warmteonttrekking is groot, vooral bij relatief dichte tussenafstand (120m verschil bij tussenafstand van 5m). Bij hogere initiële bodemtemperatuur van +1 of -1 °C nemen de boormeters met ongeveer 10m af of 10m toe onafhankelijk van de tussenafstand.





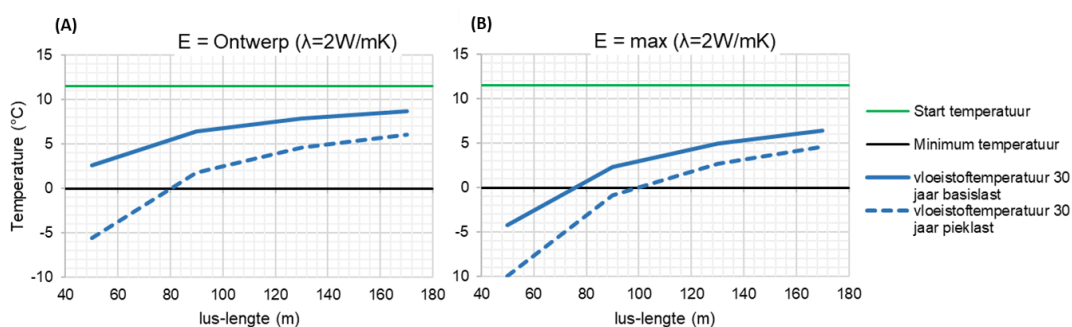
Figuur L-4. benodigde boordiepte van het collectieve (4x12) GBES (standaard energievraagpatroon) voor variërende energievragen, warmtegeleidingscoëfficiënten en bodemtemperaturen voor variërende tussenafstanden.

L.5.2

Iteratieve berekeningen voor 46 individuele GBES met EED en ITGBES-PRO

EED berekeningen vloeistoftemperatuur van individuele BWW voor variërende dieptes

De berekende vloeistoftemperatuur na 30 jaar neemt toe bij een grotere boordiepte van de individuele GBES. Om aan de minimale temperatuur van 0 °C te kunnen voldoen moet één enkele BWW met het 'ontwerp' energieprofiel tenminste een boordiepte hebben van ca. 80m (Figuur-L5a). Bij de maximale bodembelasting (energieprofiel max) is dit ongeveer 100m (Figuur-L5b). Op basis van de gevonden relaties tussen boordiepte en vloeistoftemperatuur wordt in het volgende hoofdstuk iteratief de optimale boordieptes berekend waarbij de afkoeling op locatie 'Y' (specifieke boring) zowel wordt bepaald door de afkoeling door de eigen bodemwarmtewisselaar, alsook door de potentiële afkoeling van de nabijgelegen bodemwarmtewisselaars van andere systemen.



Figuur L-5. Berekening van vloeistoftemperatuur voor boordiepte 50, 90, 130 en 170m na 30 jaar voor basislast en pieklast voor een individuele BWW met (A) het ontwerp energieprofiel en (B) het maximale belasting energieprofiel.

Individueel geoptimaliseerde boordieptes bij gelijke condities alle appartementen

Tabel-14 geeft de resultaten voor de clusterberekeningen voor scenario's 1 t/m 12. Tabel-15 geeft een vertaling van de berekende boordieptes naar procentuele toenames en afnames. De procentuele afname in benodigde boormeters bij hogere warmtegeleidingscoëfficiënten is min of meer gelijkmatig voor alle 4 de beschouwde energieprofielen, en bedraagt ca. 20-30%. Het verschil in de benodigde hoeveelheid boormeters tussen de 4 energieprofielen bij gelijke warmtegeleidingscoëfficiënten is ook duidelijk zichtbaar uit Tabel-15: ca. 50% verlaging van gemiddeld ten opzichte van minimaal, en ca. 75% toename vanaf gemiddeld bij profiel energieprofiel maximaal.

Tabel-14. Overzicht resultaten boordieptes in m – mv (gem. Min. Max.) voor de verschillende scenario's met combinaties energievragen en warmtegeleidingscoëfficiënten.

Scenario	Warmtegeleidingscoëfficiënt bodem (W/mK)	Energieprofiel	Gem boordiepte	Min boordiepte	Max boordiepte
1	2,00	Ontwerp	132	92	159
2	2,65	Ontwerp	112	82	133
3	3,30	Ontwerp	99	75	115
4	2,00	Minimaal	66	60	69
5	2,65	Minimaal	60	55	62
6	3,30	Minimaal	55	51	57
7	2,00	Maximaal	231	135	293
8	2,65	Maximaal	199	117	251
9	3,30	Maximaal	175	104	221
10	2,00	Gemiddeld	120	86	145
11	2,65	Gemiddeld	103	77	121
12	3,30	Gemiddeld	91	71	104

Tabel-15. Procentuele verschillen in totale hoeveelheid boormeters voor de doorgerekende scenario's.

Energieprofiel	Vershil totale hoeveelheid boormeters laagste en hoogste WGC (%)	Gemiddeld verschil totale hoeveelheid boormeters ten opzichte van ontwerp bij gelijke warmtegeleiding (%)
Ontwerp	33	0
Minimaal	20	-47
Maximaal	32	+76
Gemiddeld	32	-8

Resultaten variërende condities individuele appartementen (scenario 13)

De resultaten voor het scenario waar de verschillende energievragen verdeeld worden over willekeurige posities binnen het cluster zijn te zien in Tabel-16, Figuur L-6 en Figuur L-7. De gemiddelde boordiepte is in alle herhalingen ongeveer hetzelfde als in scenario 11 uit Tabel L7. Hieruit volgt duidelijk dat heterogeniteit in de energievraag binnen een cluster individuele bodemenergiesystemen weinig invloed heeft op de totale hoeveel te boren meters voor een project als geheel.

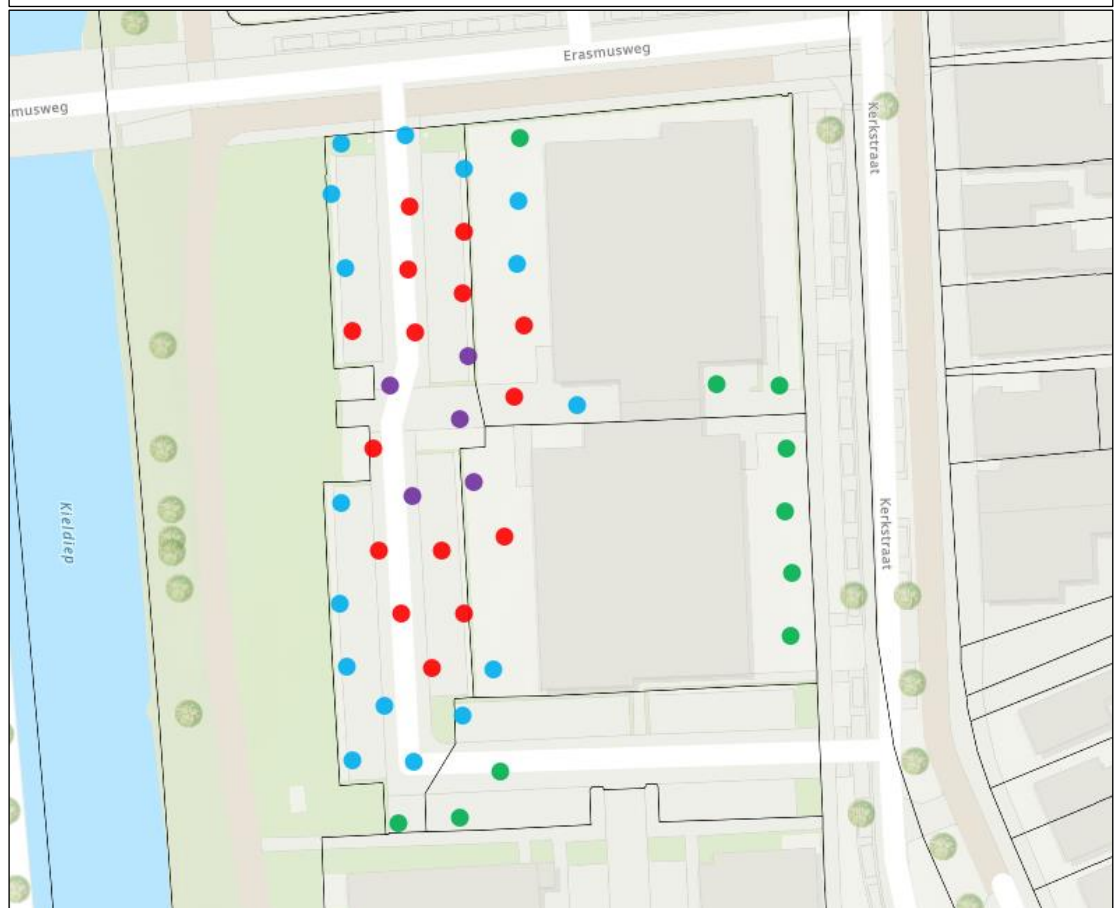
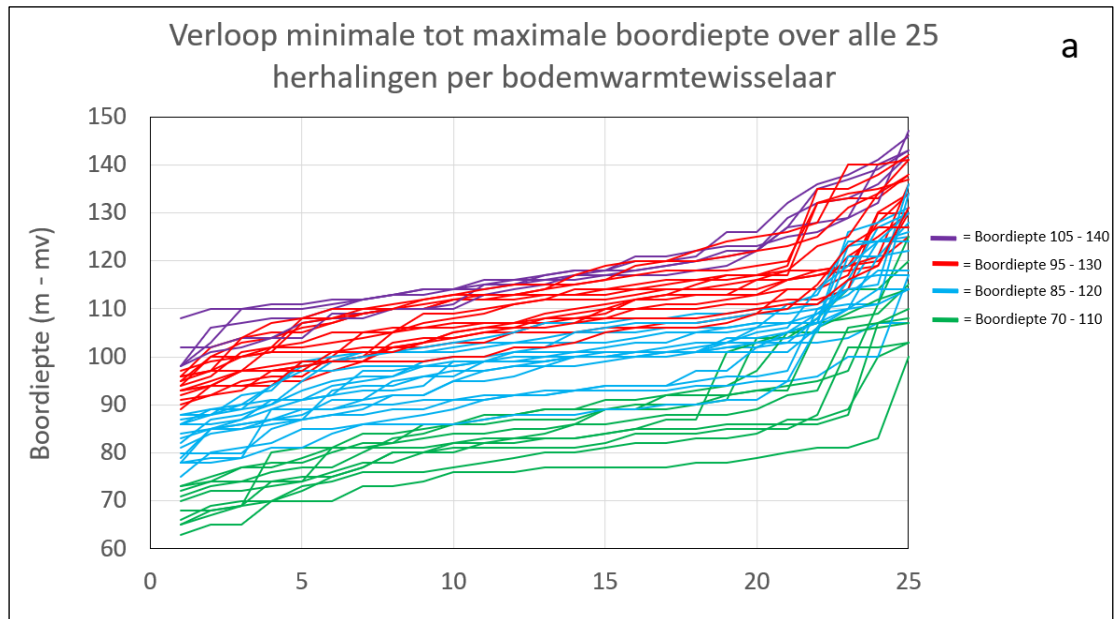
Tabel-16. Overzicht resultaten benodigde hoeveelheden boormeters voor de 25 herhalingen van scenario 13.

Herhaling	Gemiddelde boordiepte (m -mv)	Minimale boordiepte (m -mv)	Maximale boordiepte (m -mv)
1	102,1	70	141
2	101,9	73	143
3	101,2	70	137
4	102,3	74	146
5	100,7	68	126
6	101,3	72	137
7	102,6	68	147
8	100,5	76	130
9	101,0	73	133
10	103,2	63	142
11	100,9	69	133
12	100,8	77	136
13	100,6	77	132
14	102,2	70	141
15	101,9	69	135
16	102,7	69	140
17	103,1	67	143
18	100,5	74	135
19	100,7	65	132
20	100,9	65	126
21	99,9	81	132
22	101,9	74	140
23	102,3	72	139
24	102,7	65	138
25	101,5	77	134

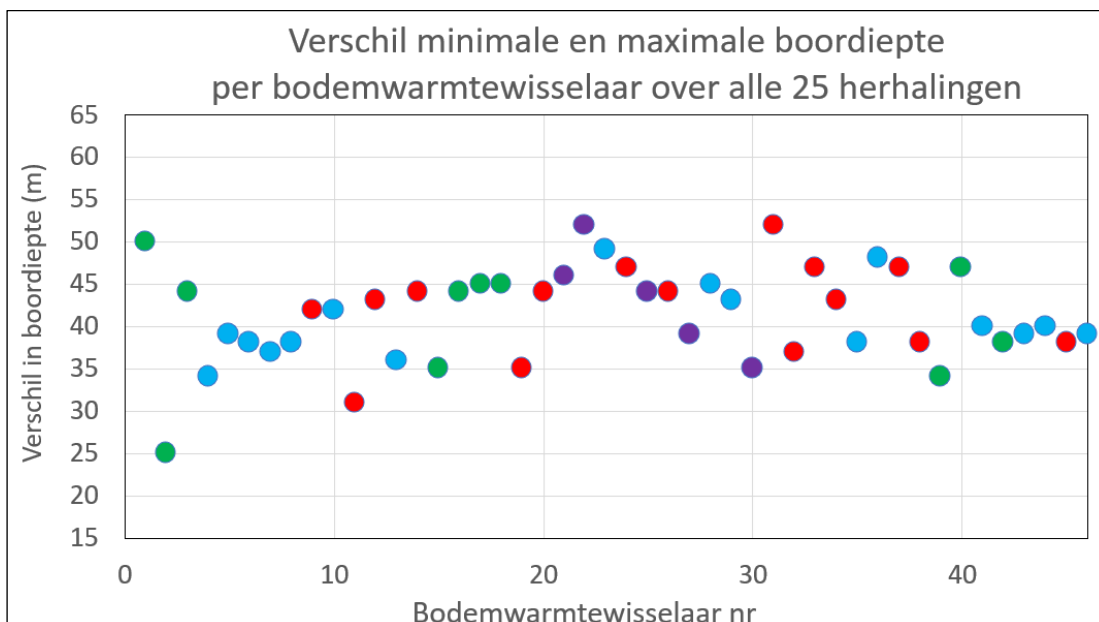
Figuur L-6a geeft een op grootte gesorteerd verloop van alle berekende boordieptes per boorpositie over de 25 herhalingen. Wanneer er in wat meer detail gekeken wordt naar het verloop van de benodigde hoeveelheid boormeters kunnen er grofweg 4 categorieën worden herkend wat betreft absolute hoeveelheden, welke zijn aangegeven in de Figuur. Figuur L6b koppelt deze kleuren uit Figuur L6a aan de locaties van iedere bodemwarmtewisselaar binnen het cluster als geheel. Zoals te verwachten liggen de systemen uit de categorie met de minste benodigde boormeters (groen) voornamelijk aan de randen, terwijl de systemen met de meeste benodigde boormeters (paars) meer centraal gelegen zijn.

Figuur L-7 geeft een overzicht van het verschil in minimale en maximale boordiepte per boorpositie, in combinatie met de kleurencodering zoals gehanteerd in Figuur L6. Voor vrijwel alle boorposities is er een verschil tussen de minimale en de maximale benodigde boormeters van rond de 40 m. Er zijn geen duidelijke verschillen tussen de systemen uit de 4 eerder gedefinieerde categorieën op basis van positie. Deze verschillen zijn met name afhankelijk van het energieprofiel wat aan een bodemwarmtewisselaar zelf wordt opgelegd vanuit een appartement of woning. Figuur L-8 illustreert dit ook. Hierin zijn alle boordieptes voor 5 BWW's uit de blauwe categorie met eenzelfde gemiddelde boordiepte (98,5 m - mv) over alle iteraties weergegeven. Vrijwel alle gevallen waarbij een van de 5 BWW's een boordiepte nodig had die

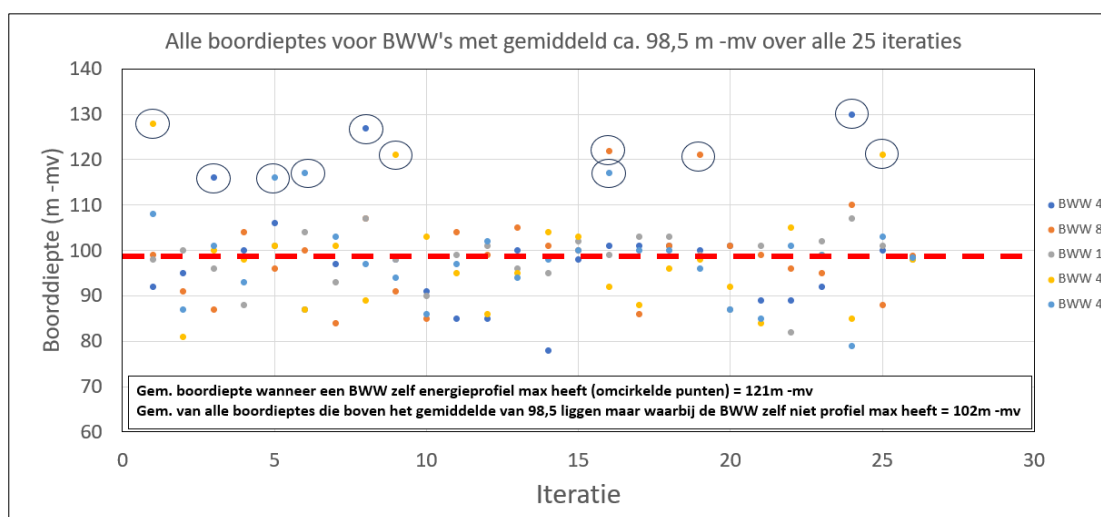
ruim boven het gemiddelde van 98,5 m –mv viel, was dit als de wisselaar zelf gekoppeld was een het maximale energieprofiel.



Figuur- L6. A) Gesorteerd (min > max) verloop benodigde boormeters over de 25 herhalingen per appartement, en onderverdeling in 4 groepen. B) Locaties bodemwarmtewisselaars binnen veld gesorteerd per groep.



Figuur L-7. Verschil minimale en maximale benodigde boordiepte over alle 25 herhalingen per appartement.



Figuur L-8. Overzicht verdeling boordieptes voor vijf bodemwarmtewisselaars met een gemiddelde boordiepte van 98,5 m -mv (rode lijn) over alle iteraties. Cirkels geven de gevallen aan waarin de desbetreffende BWW het energieprofiel 'maximaal' had.

L.6 Discussie

Uit alle analyses op lange tijdschaal blijkt dat de hoeveelheid benodigde boormeters sterk worden beïnvloed door de initiële bodemtemperatuur, de warmtegeleiding van de bodem en de absolute hoeveelheid energie die er uit de bodem gehaald dient te worden. Onafhankelijk van de ontwerpmethodiek (A, B, of C) of het type systeem (individueel versus collectief) die er gekozen wordt, is het van belang om deze parameters goed te kunnen inschatten. Uit deze analyse blijkt echter dat de prestatie zekerheid voor individueel geclusterde systemen een grotere onzekerheid met zich meebrengt t.o.v. collectieve systemen. Het goed in kaart brengen van verschillende ontwerpuitgangspunten lijkt voor individueel geclusterde systemen dus belangrijker dan voor collectieve systemen.

L.6.1 Bodemparameters

Wat betreft de bodemtemperatuur is er een redelijke hoeveelheid literatuur al beschikbaar om een (conservatieve) schatting te kunnen maken. Binnen een goed ontwerp conform BRL 11000, protocol 11001 zou een ontwerper hier in principe rekening mee moeten kunnen houden.

Voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem is de huidige beschikbare literatuur minder toereikend, zoals ook bleek op de projectlocatie te Hoogezand. Eventueel kan op basis van een gevoeligheidsanalyse wel rekening gehouden worden met verschillende mogelijke waardes, om vervolgens voor een conservatieve waarde te kiezen. Probleem hierbij is echter wel dat 'conservatief' niet voor alle systemen binnen een groep individueel geclusterde GBES hetzelfde zal betekenen. Wanneer systemen erg dicht op elkaar staan zorgt een hogere warmtegeleiding voor een snellere 'toestroom' van energie uit de omgeving waardoor de systemen beter zullen functioneren. Staan systemen in een cluster wat verder uit elkaar kan een hogere warmtegeleding juist betekenen dat ze elkaar meer gaan beïnvloeden vergeleken met een lagere warmtegeleiding. Op basis van de topologie van alle systemen in een bepaald gebied zou dan eigenlijk per positie gekeken moeten worden wat een conservatieve inschatting is, wat het ontwerpproces een stuk gecompliceerder maakt. Voor een collectief systeem is een lage warmtegeleidingscoëfficiënt wel altijd bruikbaar als conservatieve parameterwaarde.

De grootste zekerheid kan in principe behaald worden wanneer op locatie middels een TRT de daadwerkelijke thermische bodemeigenschappen worden vastgesteld. Nadeel hieraan zijn de bijkomende kosten, maar zeker bij grotere projecten kan een juist beeld van de bodemparameters ook significante besparingen opleveren met betrekking tot de berekende hoeveelheid benodigde boormeters.

Voor de energievraag die er vanuit de woningen of appartementen wordt opgelegd aan de wisselaars kan in eerste instantie een conservatieve inschatting worden gemaakt. Dit is in de praktijk op dit moment ook vaak al het geval. Desalniettemin blijft de uiteindelijke verdeling van energievraag aan de hand van de individuele gebruikers een complicerende factor.

Wanneer methode A gehanteerd wordt valt hier in principe geen rekening mee te houden. Conform methode B zou eventueel een zeer conservatieve inschatting gemaakt kunnen worden voor de benodigde boormeters voor het systeem in het midden van het cluster. De daaruit volgende hoeveelheid boormeters kunnen dan aan alle posities worden toegewezen, dit zorgt echter wel voor een grove overschatting van de benodigde boormeters en maakt een project minder haalbaar qua kosten. Ook wanneer methode C gevolgd wordt is het lastig om met variaties in energievraag goed rekening te houden. Zoals in scenario's 7 t/m 9 uit Tabel L7 is gedaan, kan weliswaar gerekend worden met een maximale waarde voor alle posities, maar ook dan zal de benodigde hoeveelheid boormeters voor het project als geheel significant overschat worden.

Een ontwerpmethode die wel een oplossing biedt om verschillen in energievraag tussen individuele gebruikers beter op te vangen is het daadwerkelijk collectief uitvoeren van een ontwerp. Zoals te zien in de resultaten uit Tabel L9 heeft variatie in verdeling van de energievraag over een cluster vrijwel geen invloed op de totale hoeveelheid benodigde boormeters zolang de totale energievraag gelijk blijft. Aangezien er bij een collectief systeem uiteindelijk maar één aanvoertemperatuur geleverd wordt, is het geen probleem als de ene wisselaar op lange termijn meer energie kan onttrekken dan een ander. Zeker voor appartementencomplexen kan dit een haalbare oplossing zijn, die ook een gelijktijdigheidsvoordeel met zich meebrengt voor wat betreft de maximaal te verwachten pieklast. Voor wijken met grondgebonden woningen zal dit echter lastiger zijn omdat er vaak geen centrale ruimte beschikbaar zal zijn.

L.7 Conclusies

- De netto bodemzijdige energievraag is sterk bepalend voor de benodigde totale lengte van de bodemwarmtewisselaars van een GBES. Dit geldt zowel bij collectief ontworpen systemen als bij geclusterde individuele systemen.
- De grote gemeten variatie in energievraag introduceert een grote onzekerheid in de benodigde lengte van de bodemwarmtewisselaars. De ontwerp energievraag is echter dusdanig conservatief bepaald dat nagenoeg alle individuele appartementen overgedimensioneerd zijn.
- Bij een grote energievraag van het individuele bodemenergiesysteem zelf is het effect van omliggende systemen op de benodigde lengte van de bodemwarmtewisselaar relatief kleiner dan bij een kleine netto energievraag.
- De positie van een individueel systeem binnen een cluster als geheel heeft een sterke invloed op de benodigde boordiepte. Een systeem in het midden van een cluster heeft meer boormeters nodig vergeleken met een systeem aan de rand. Voor de geometrie uit deze analyse resulteert dit bij een uniforme energievraagverdeling in 40 tot 50m gemiddeld verschil in boordiepte tussen de meest en minst gunstig gelegen BWW's.
- Voor collectieve systemen zijn variaties in de gebruikspatronen tussen individuele gebruikers vrijwel niet van invloed zolang de totaalvraag gelijk blijft. Een collectief systeem biedt daarom een grotere mate van zekerheid wat betreft het ontwerp ten opzichte van individuele systemen, waardoor minder boormeters nodig zullen zijn om de prestatie van het systeem te kunnen waarborgen.
- De thermische parameters van de bodem (ongestoorde bodemtemperatuur, warmtegeleidingscoëfficiënt bodem) hebben ook een significante invloed op de benodigde hoeveelheid boormeters. Dit geldt zowel voor collectieve systemen als voor individueel geclusterde systemen.
- De deviaties van de verticaal van de boortrajecten kunnen, voor situaties waar BWW's dicht op elkaar staan (< 10 meter afstand) tot een mogelijk grotere thermische interferentie leiden dan op basis van de coördinaten aan het oppervlakte berekend. Voor collectieve systemen heeft dit geen effect, aangezien deze effecten gelijkmatig over alle bodemwarmtewisselaars verdeeld worden. Bij clusters van individuele systemen geldt dat het zeer onwaarschijnlijk is dat alle omringende bodemwarmtewisselaars naar een specifiek systeem toegericht zijn. Met andere woorden: de afwijkingen van de verticaal heffen elkaar deels op en gemiddeld zullen de cumulatieve effecten gelijk zijn. Echter, de kans dat twee boortrajecten elkaar raken blijft wel altijd aanwezig, en de mogelijkheid daartoe zou zoveel mogelijk beperkt moeten worden door het meenemen van adequate tussenafstanden binnen een ontwerp, zoals voorgeschreven in het protocol.

In het algemeen laat deze analyse zien dat geclusterde individuele systemen extra onzekerheden met zich meebrengen t.o.v. collectieve GBES. Omwille van deze onzekerheid worden de lussen van een individueel geclusterd systeem ontworpen met een grotere boordiepte t.o.v. een collectief systeem. Deze onzekerheid wordt vooral veroorzaakt door het potentieel grote verschil in individuele energieverbruik van de verschillende GBES. Zeker als het individuele energiegebruik niet binnen een relatief kleine marge kan worden vastgesteld lijkt het de grote voorkeur te hebben om, in situaties waar BWW's dicht op elkaar geplaatst moeten worden, te kiezen voor een collectief systeem om het aantal benodigde boormeters te kunnen minimaliseren en de prestaties van de GBES te kunnen waarborgen. Indien

grondwaterstroming geen belangrijke rol heeft bij warmtetransport op een specifieke locatie, zijn Earth Energy Designer en ITGBES geschikte tools om een ontwerp op te stellen voor zowel collectieve en individueel geclusterde GBES.

M Verslag workshop implicaties OPTIGBES voor richtlijnen en protocollen - D4.2 en D5.2

1 Inleiding

Op woensdagmiddag 17 april 2024 hebben KWR, GroenHolland, SIKB, de branchevereniging Bodemenergie en Deltares een stakeholder workshop georganiseerd in het kader van het OPTIGBES-project. De workshop vond plaats bij KWR Water, Groningerhaven 7 in Nieuwegein.

De workshop had als titel: *Gesloten bodemenergiesystemen en temperatuurverandering in de ondergrond, het echte verhaal; implicaties voor ontwerp en richtlijnen voor interferentie*

Het doel van de workshop was om resultaten van het OPTIGBES project te delen en feedback te krijgen van een brede groep aan stakeholders op de vraag of de resultaten een basis bieden voor aanpassing/aanscherping van protocollen en richtlijnen. De workshop en de resultaten daarvan vormen deliverables D4.2 en D5.2 van OPTIGBES. Deze twee deliverables hebben betrekking op protocollen en regelgeving rond respectievelijk ontwerpprocedures van GBES en interferentieberekeningen.

2 Aanpak

Het OPTIGBES consortium heeft ter voorbereiding van de workshop een eerste programma opgezet op basis van de verkregen resultaten van het onderzoek. Op basis hiervan is een eerste uitnodiging uitgestuurd op 28 februari 2024 naar de stakeholders. In de maanden daaropvolgend is gezamenlijk gewerkt aan een verdere uitwerking van het programma. Om een goede interactie met de stakeholders te krijgen is besloten om een Lagerhuisdebat op te zetten. Hierin werden de uitdagingen rondom de implementatie en optimalisatie van het gesloten bodemenergiesystemen bediscussieerd aan de hand van stellingen.

In de volgende paragraaf is een verslag van de workshop weergegeven met daarin ook verwerking van reacties uit het publiek. De stellingen en discussies van dit Lagerhuisdebat zijn ook meegenomen in het verslag van deze workshop.

3 Verslag van de workshop

De middag werd gestart met een welkom door KWR waarin het doel van de middag en het programma van de middag werd gepresenteerd. Als eerste onderdeel werd het project geïntroduceerd met start van het initiatief als onderdeel van TKI Urban Energy en de presentatie van het doel het project "Onderzoeken of het mogelijk is om de 15.000-20.000 nieuwe GBES (gesloten bodemenergiesystemen) per jaar efficiënter te implementeren door ze dichter bij elkaar of korter te plaatsen".

Vervolgens werd de onderzoek locatie toegelicht in Hoogezand met 46 appartementen aangesloten op een eigen lus en individuele warmtepomp. Deze warmtepompen zijn aangesloten op bodemlussen die geïnstalleerd zijn in boorgaten tot 130 m -mv. Uit de deviatie metingen uitgevoerd in de bodemlussen is gebleken dat er een deviatie kan optreden wat het risico verhoogt op het raken van andere lussen. Op basis van deze gemeten deviaties is een 3d-model gemaakt van de oriëntatie van de bodemlussen.

De workshop bestond uit twee rondes:

- Ronde 1: Resultaten analyse ontwerp
- A. Energievraagpatroon
 - B. Achtergrond temperatuur T(z)
 - C. Thermische bodemeigenschappen
 - D. Model: respons (piek)belasting

Ronde 2:

1. Resultaten analyse interferentie
2. Implicaties voor ontwerp en bedrijfsvoering

Ronde 1: Resultaten analyse ontwerp

De gebouwzijdige metingen besproken, waarin werd besproken dat er niet direct een koppeling te maken was tussen de gebouwzijdige metingen en de metingen aan de bodemwarmtewisselaars van de drie appartementen. Bij de presentatie van de variatie in warmtevraag (30-173% gebouwzijdig, 27-173% bodemzijdig) en koelvraag niet standaard gemeten, maar eigen metingen tonen hogere rendementen dan verwacht (spf winter 7-5, spf zomer 3) kwam als reactie uit het publiek dat er bij nieuwbouw in eerste jaar vaak vocht aanwezig is waardoor er een hogere warmtevraag is in het eerste jaar. Dit is van belang om mee te nemen als factor voor warmte- en koude vraag.

In het onderdeel thermische eigenschappen werd ingegaan op uitgangspunten van de grondwater grondwatertemperatuur. De ontwerptemperatuur is 1°C hoger dan de werkelijkheid en dat het gebruik van lineair temperatuurprofiel onrealistisch is. Vervolgens werd er ingegaan op de Warmtegeleidingscoëfficiënt die hoger was dan de 5 kW/m/dag, hoger dan de ontwerpwaarde. Dit zou waarschijnlijk beïnvloed zijn door factoren zoals mineralogie en compactie door landijs. Een belangrijke bevinding uit de modelberekeningen met EED laten zien dat de warmte uitwisseling in het horizontaal leidingwerk van lus naar appartement belangrijk is voor een nauwkeurige modellering. Dit is ook een resultaat wat bevestigd werd door de temperatuurmetingen met de glasvezel.

Ronde 2: Resultaten analyse interferentie

Vanuit de verificatie van het model werd het effect van netto afkoeling zichtbaar na enkele jaren en met de waarde van de TRT (Thermal Response Test) waarden werd dit nog verbeterd. Er werd geconcludeerd dat de afwijkingen tussen berekende en gemeten temperaturen klein zijn (max. 0,5°C) en dat een goede inschatting van thermische bodemeigenschappen en realistische energiebehoefte cruciaal zijn. Vervolgens werd er verder gegaan met de implicaties voor ontwerp en bedrijfsvoering. Hierin kwam naar voren dat een het effect van deviatie gemiddeld beperkt is in groot lussenveld, maar dat door de variatie in energievraag en bodemeigenschappen de worst-case scenario's overbodig maakt. Ook werd ingegaan op het benodigde totaal geboorde boormeters met variaties van 2.523 m tot 10.664 m. Deze variaties zijn afhankelijk van scenario's, waarin gesteld wordt dat de meeste systemen zijn over gedimensioneerd.

De workshop werd afgesloten met een Lagerhuisdebat waarin de volgende stellingen werden bediscussieerd:

Lagerhuisdebat – Stellingen:

1. Protocol 11001 voldoet voor thermische bodemeigenschappen:
50% eens, 50% oneens; discussie over nauwkeurigheid en flexibiliteit van parameters.

2. Differentiëren thermische eigenschappen voor locatie en diepte:
60-65% eens, 35-40% oneens; uitdagingen bij implementatie voor ontwerpers.

3. Conservatief ontwerp definiëren in protocol 11001:

45% nee, 5% ja, 50% weet niet; behoefte aan duidelijkheid en flexibiliteit in ontwerpkeuzes.

4. Variatie energievraagpatroon meenemen in BRL 6000-21:

30% eens, 30% oneens, 40% weet niet; belang van realistische energiestudies en actualisering van normen.

5. Uitwerken schema ontwerp procedure in protocol 11001:

35% eens, 35% nee, 30% weet niet; behoefte aan duidelijke richtlijnen versus praktische haalbaarheid.

Uit het debat blijkt geen duidelijke consensus over de noodzaak tot aanpassing van de vigerende protocollen. Wel is er brede steun voor uitbreiding van informatie (ISSO73) om de benodigde thermische bodemeigenschappen te kunnen differentiëren voor een locatie en voor het dieptetraject.

N Overzicht van disseminatieactiviteiten OPTIGBES – D6.1

Deze bijlage geeft een overzicht van de disseminatie activiteiten van het project OPTIGBES en fungeert als deliverable D6.1. De onderstaande tabel geeft het overzicht weer:

Disseminatie activiteit	Datum	Consortium-partner(s)	Auteur(s)	(Web)link /
Presentatie voor Kennisplatform Bodemenergie, Almere	23-9-2020	Deltares, GroenHolland, KWR, Nathan, SIKB	Henk Kooi, Henk Witte, Martin Bloemendal, Theo Bauerhuit, Arthur de Groof	
Item in nieuwsbrief Bodemenergie Nederland	18-2-2021	Deltares, GroenHolland	Henk Kooi, Henk Witte	https://bodemenergie.nl/project-optigbes
Extended abstract en presentatie op European Geothermal Congress	10-2022	GroenHolland	Henk Witte, Roy Boots	http://optigbes.nl/rapporten/239-ITGBES-PRO.pdf
Extended abstract en presentatie op Enerstock 2024, Lyon	6-2024	GroenHolland, Deltares	Henk Witte, Daniel Bakker, Manos Pefkos, Pieter Doornenbal , Henk Kooi	