

Warmteoverdracht agrarische percelen

Warmteleiding Vlaardingen – Den Haag



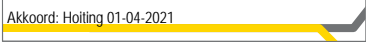
warmteoverdracht agrarische percelen
warmteleidingen Vlaardingen – Den Haag

Auteur(s)

dr.ir. J.M. van Esch

dr.ir. J.G. Wesseling

warmteoverdracht agrarische percelen
warmteleidingen Vlaardingen – Den Haag




Opdrachtgever	N.V. Nederlandse Gasunie	
Contactpersoon	de heer K. Hoiting	
Trefwoorden	warmtetransportleidingen, klimaatmodel, dgflow	

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	17-3-2021
Projectnummer	11205411-001
Document ID	11205411-001-GEO-00024
Pagina's	49
Status	definitief

Auteur(s)

	dr.ir. J.M. van Esch	
	dr.ir. J.G. Wesseling	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	dr.ir. John van Esch	dr. Henk Kruse	ing. Harm Aantjes	
				

Samenvatting

In deze rapportage worden de berekende temperatuurseffecten in de ondergrond rond de warmteleiding Vlaardingen – Den Haag en de daaraan gerelateerde inschatting van de gewasschade gepresenteerd. De berekeningen zijn uitgevoerd met een voor deze studie ontwikkeld warmtemodel DgFlow dat bestaat uit een gekoppelde klimaatmodule en ondergrondmodel. Met de klimaatmodule worden KNMI gegevens zoals: atmosferische temperatuur, kortegolfstraling, windsnelheid, vochtgehalte en neerslag vertaald naar verdampingsfluxen en latente warmtefluxen aan het maaiveld. Het warmtemodel voorspelt vocht- en warmtefluxen in de bodem als gevolg van warmtebronnen in de ondergrond bij de gegeven atmosferische condities.

Het warmtemodel DgFlow is gevalideerd met warmtemetingen langs de warmteleiding over Noord van Eneco in Vlaardingen. Daarbij zijn meteorologische gegevens van het weerstation Rotterdam gebruikt. De metingen die in Vlaardingen zijn uitgevoerd geven een goed beeld van de temperatuurverdeling rond de warmtetransportleidingen. Er wordt een temperatuursverhoging van ongeveer 3 graden gemeten boven de warmteleiding op 20 cm onder maaiveld. De validatieberekeningen laten zien dat de temperatuursverhogingen goed worden voorspeld met het opgestelde rekenmodel. De temperatuursverhoging die wordt gevonden is eveneens ongeveer 3 graden. Wel onderschat de eerste berekening de absolute sensortemperaturen met 2 graden en overschat de derde berekening de absolute waarde met een zelfde temperatuurverschil. De tweede berekening is leidend geweest in de modelkalibratie en komt daarom het best overeen met de gemeten waarden (zonder absoluut temperatuurverschil). De heterogeniteit van de ondergrond is mogelijk de oorzaak van de verschillen. Uit metingen en berekeningen blijkt dat de atmosferische invloed op de temperatuur in de ondergrond tot een diepte van ongeveer drie meter reikt. De modelberekeningen laten verder zien dat het belangrijk is om de ontwikkeling van de onverzadigde zone en de invloed van de zone op de indringing van de temperatuur aan het oppervlak goed mee te nemen. Ook mag de uitstraling van de warmtebronnen in de bodem naar het oppervlak, bij het berekenen van de temperatuur aan maaiveld, niet worden verwaarloosd.

Bij de berekeningen die zijn uitgevoerd om de effecten op het gewas langs de warmteleiding Vlaardingen – Den Haag te bepalen, is uitgegaan van een hogere temperatuur van de vloeistof in de leiding dan de gemeten temperatuur in de warmteleiding over Noord van Eneco. Als gevolg daarvan geven de berekeningen een hogere, maar beperkte, warmtetoeename boven de aanvoerleiding op 20 cm beneden maaiveld dan de gemeten temperatuur boven de Eneco leiding. De warmtetoeename in de onderzochte profielen bedraagt ongeveer 4 graden. De voorspelling is daarmee conform de verwachting op basis van eerder uitgevoerde metingen.

Voor de gewasgroei zijn berekeningen gedaan met een aangepaste gewasgroeimodule van het model Swap. Ten behoeve van het huidige project is in deze module de invloed van de bodemtemperatuur op de gewasgroei geïmplementeerd. Uit de resultaten van de berekeningen blijkt dat op 5 m van de aanvoerleiding het verlies aan gewasopbrengst door de bodemverwarming minder is dan 1%. Gemiddeld over de vier beschouwde profielen veroorzaakt de bodemverwarming een opbrengstverlies van 17.5% in een strook van 5 m aan weerszijden van de warmteleidingen.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Inhoud	5
1	Inleiding	6
2	Probleemstelling	8
3	Leiding over Noord	9
3.1	Eerste meetlocatie	10
3.1.1	Beschikbare gegevens	10
3.1.2	Berekeningen	11
3.2	Tweede meetlocatie	14
3.2.1	Beschikbare gegevens	14
3.2.2	Berekeningen	15
3.3	Derde meetlocatie	18
3.3.1	Beschikbare gegevens	18
3.3.2	Berekeningen	19
4	Leiding Vlaardingen – Den Haag	23
4.1	Bodemprofiel 16	24
4.1.1	Beschikbare gegevens	24
4.1.2	Warmteberekening	25
4.1.3	Effecten van de warmteleiding	27
4.2	Bodemprofiel 21	29
4.2.1	Beschikbare gegevens	29
4.2.2	Warmteberekening	30
4.2.3	Effecten van de warmteleiding	31
4.3	Bodemprofiel 31	32
4.3.1	Beschikbare gegevens	32
4.3.2	Warmteberekening	33
4.3.3	Effecten van de warmteleiding	34
4.4	Bodemprofiel 57	34
4.4.1	Beschikbare gegevens	34
4.4.2	Warmteberekening	35
4.4.3	Effecten van de warmteleiding	36
5	Conclusies en aanbevelingen	37
	Referenties	40
A	Bodemfysische eenheden	41
B	Boringen	43
C	Meteorologische gegevens	47

1 Inleiding

Begin 2020 heeft de Gasunie Deltares en de WUR gevraagd om gezamenlijk de eventuele nadelige effecten van de aanleg van de warmteleiding Vlaardingen – Den Haag voor gewassen in agrarische gebieden in kaart te brengen. Het onderzoek volgt op een verkennende studie die door de AnteaGroup is uitgevoerd. In de verkennende studie zijn de temperatuurseffecten in de ondergrond rond de aan te leggen warmtetransportleidingen onderzocht binnen een onderzoeksgebied met een lengte van 3,5 km. Daarvoor zijn 14 profielen in een zomer- en wintersituatie doorgerekend met het grondwaterstromingsprogramma MicroFem. Daarbij is alleen gekeken naar warmteoverdracht door geleiding in een stationaire situatie.

Dit rapport beschrijft het onderzoek dat door Deltares en de WUR is uitgevoerd en waarbij een meer gedetailleerde manier van modelleren wordt toegepast. Het onderzoek is in 4 stappen uitgevoerd:

- De eerste stap is een modelmatige stap en betreft het opzetten van een gedetailleerde module in het eindige elementen programma DgFlow.
- De tweede stap betreft metingen in het veld rond een warmteleiding van Eneco. De metingen worden gebruikt om het model te valideren.
- In de derde stap worden vier profielen nagerekend met het eindige elementen model DgFlow. De 4 profielen zijn in samenspraak met de WUR uit het AnteaGroup rapport overgenomen.
- In de vierde stap onderzoekt WUR of de resultaten (voorspelde waarden) een negatieve invloed hebben op de gewasopbrengst.

Met het programma DgFlow kan grondwaterstroming en warmtetransport door de ondergrond worden berekend. Daarbij wordt een verdampingsflux en een warmteflux aan het oppervlak opgelegd. In de eerste stap van dit project wordt een klimaatmodule ontwikkeld waarmee deze fluxen kunnen worden bepaald. Met het gekoppelde programma wordt het effect van de onverzadigde zone daarmee beter beschreven; een afname van het vochtgehalte geeft een afname van de geleidbaarheid en een afname van de warmtecapaciteit. Het gevolg van de afname van de verzadigingsgraad direct boven de leiding, door de hogere temperaturen daar, wordt daarmee gekwantificeerd.

De rekenresultaten geven een voorspelling van de temperatuur en de vochtverdeling in de bodem en kunnen worden vergeleken met meetresultaten. In de tweede stap wordt het model gevalideerd door de voorspelling van de warmteverdeling langs een bestaande warmteleiding op drie locaties met metingen te vergelijken. In totaal zijn daarvoor 15 temperatuursensoren en 5 bodemvochtsensoren per meetlocatie geïnstalleerd (zie onderstaande figuur). Het onderzoek richt zich vooral op de opwarming van de grond rond de leiding. Daarvoor zijn 3 temperatuursensoren boven de leiding (0,9, 0,6 en 0,3 m -mv) geplaatst, één op de leiding en zes sensoren verticaal (3,0, 2,5, 2,0, 1,5, 1,0 en 0,5 m -mv) boven elkaar in twee gatsboringen op verschillende afstanden (1,0 en 2,0 m) naast de leiding geïnstalleerd. Tevens zijn er 3 vochtmetingen boven de leiding uitgevoerd (0,9, 0,6 en 0,3 m -mv) en twee bij de buitenste meetlans (0,6 en 0,3 m -mv).

De thermische eigenschappen van de ondergrond worden bepaald met hete naaldproeven die in het laboratorium zijn uitgevoerd op grondmonsters. Per locatie is voor het verzamelen van de monsters één boring tot 5 meter beneden maaiveld uitgevoerd.



Figuur 1.1 Meetlocatie Vlaardingen

De eerste twee stappen zijn gerapporteerd in het Deltares (2021) rapport “heat supply pipelines in agricultural areas”. Het voorliggende rapport geeft een samenvatting van de metingen en berekeningen die zijn uitgevoerd langs de warmteleiding over Noord en presenteert de resultaten van de laatste twee stappen; de berekeningen die zijn uitgevoerd voor de warmteleiding Vlaardingen – Den Haag en de inschatting van de gewasschade.

In Hoofdstuk 2 wordt de probleemstelling omschreven. Hoofdstuk 3 geeft een samenvatting van de metingen en berekeningen die uitgevoerd zijn bij de leiding over Noord. De resultaten worden gepresenteerd per meetlocatie. In Hoofdstuk 4 worden de resultaten van de berekeningen die zijn uitgevoerd voor de warmteleiding Vlaardingen – Den Haag gepresenteerd. De resultaten worden voor vier bodemprofielen besproken. Hoofdstuk 5 bevat conclusies en aanbevelingen.

2 Probleemstelling

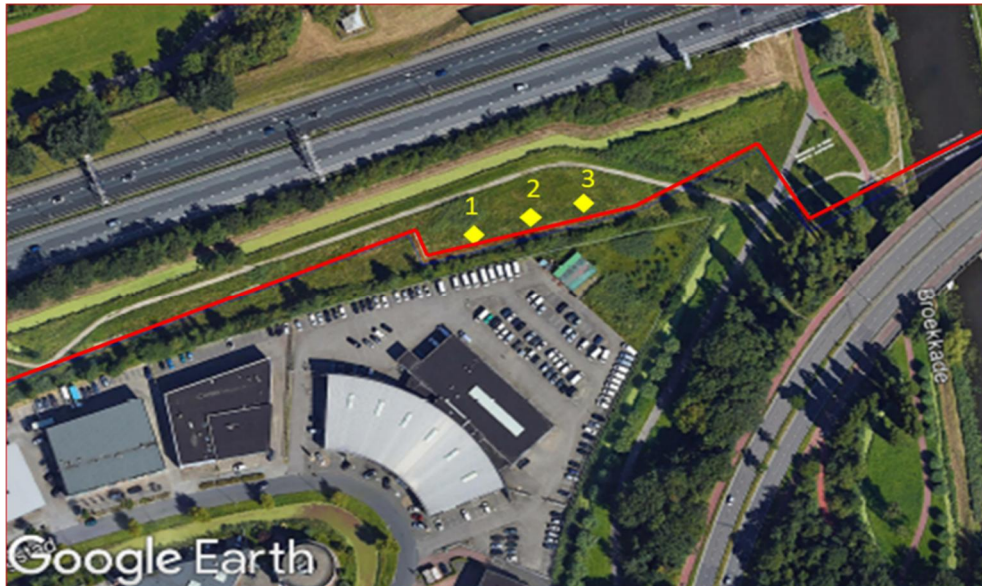
Bij de verkennende berekeningen die door de Antea Group zijn uitgevoerd zijn een aantal aannamen gedaan die de werkelijkheid mogelijk vereenvoudigen. Gedwongen convectorie door grondwaterstroming en vrije convectorie door dichtheidsverschillen, die ontstaan als gevolg van temperatuursverschillen, zijn niet in de beschouwing meegenomen. Ook is het warmtetransport door straling en waterdamptransport (bodemvocht) niet meegenomen in de analyse. Aan maaiveld is een constante temperatuur voorgeschreven die in de zomersituatie aan de lage kant is. Door het opleggen van de temperatuur is de waarde onafhankelijk van de opwarming in de ondergrond. De warmteflux aan het maaiveld door evapotranspiratie van grondwater wordt niet meegenomen en de verzadigingsgraad die verder afneemt door verdamping wordt niet expliciet berekend. In de gepresenteerde berekeningen is de verzadigingsgraad constant verondersteld en verdisconteerd in de thermische eigenschappen van de bodemeenheden. De verzadigingsgraad (bodem vochtgehalte) heeft echter een grote invloed op de geleiding van warmte in de ondergrond.

Om bovengenoemde effecten wel in rekening te brengen moest het rekenmodel DgFlow, waarmee stroming en warmtetransport door de ondergrond kan worden gemodelleerd, worden uitgebreid met een klimaatmodule (stap 1). Voordat het nieuwe rekenmodel op een verantwoorde manier kan worden gebruikt moet het model gevalideerd worden met metingen (stap 2).

Met het nieuwe DgFlow model kunnen veranderingen van de atmosferische omstandigheden gedurende enkele jaren worden meegenomen in de berekeningen. Ook de koppeling met het vochtgehalte in de ondergrond maakt dat het DgFlow model meer gedetailleerd het warmte gedrag in de grond kan berekenen. Met het nieuwe model moeten berekeningen voor de warmteleiding Vlaardingen – Den Haag worden gemaakt (stap 3) waarvan het resultaat in de Swap module wordt gebruikt om de effecten op de gras opbrengst te berekenen (stap 4). Langs deze weg hoeft niet worden uitgegaan van niet onderbouwde temperatuur grenswaarden.

3 Leiding over Noord

Figuur 3.1 geeft de meetlocaties in een bovenaanzicht weer. De metingen zijn uitgevoerd in een groenstrook in Vlaardingen langs de A20 achter een bedrijventerrein.

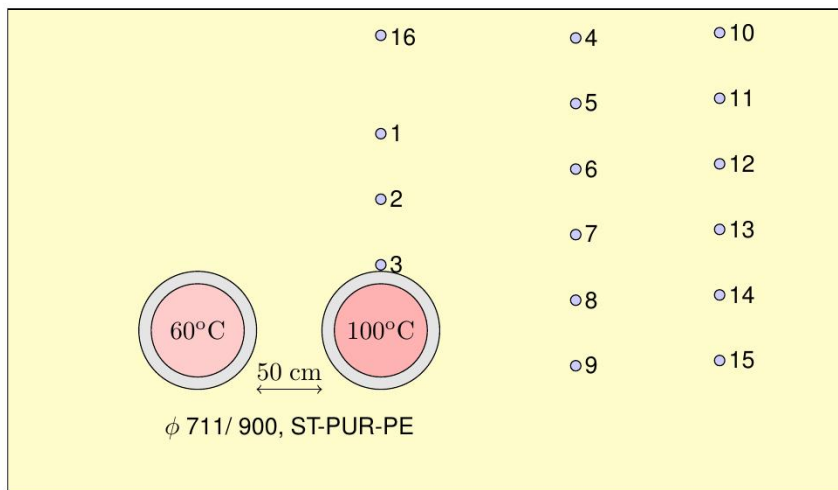


Figuur 3.1 Meetlocaties leiding over Noord

In Figuur 3.2 zijn de meetlansen afgebeeld waarin de temperatuursensoren zijn opgenomen. Figuur 3.3 geeft een schematisch overzicht van de geplaatste sensoren ten opzichte van de aanvoerleiding en de afvoerleiding op de 3 meetlocaties.



Figuur 3.2 Meetlansen met temperatuursensoren



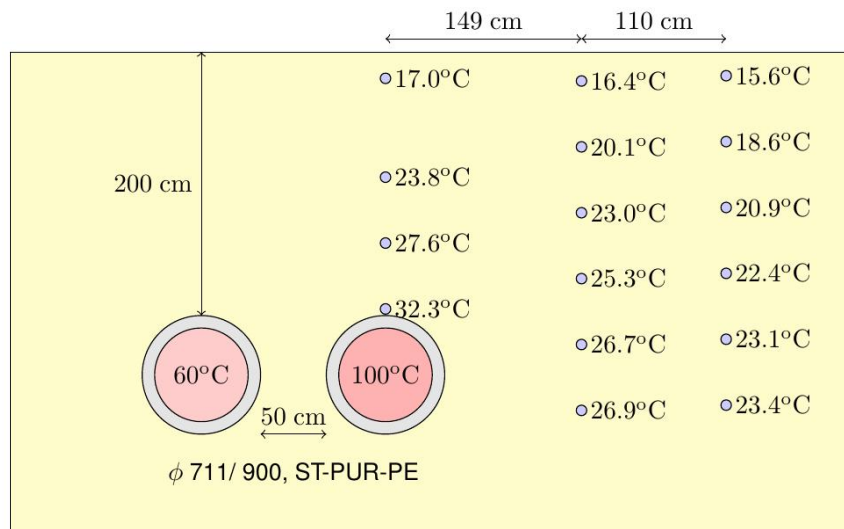
Figuur 3.3 Schematische weergave temperatuursensoren

De locaties van de KNMI weerstations zijn afgebeeld in Figuur C 1. Voor deze studie is de data van station Rotterdam gebruikt. De meetdate van weerstation Rotterdam die in de berekeningen is verwerkt is afgebeeld in Figuur C 2.

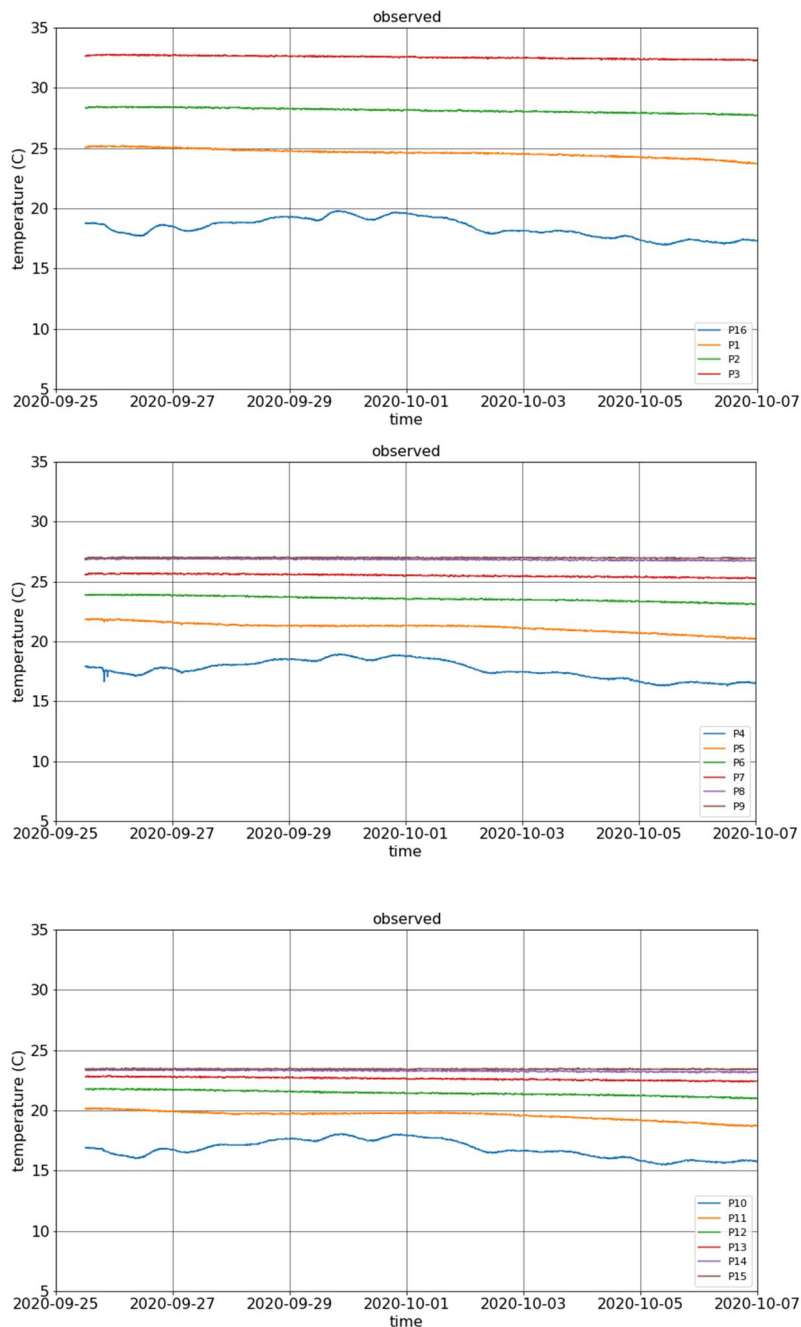
3.1 Eerste meetlocatie

3.1.1 Beschikbare gegevens

In Figuur 3.4 zijn de posities van de sensoren op de eerste meetlocatie en de ligging van de aanvoer- en retourleiding afgebeeld. In de figuur zijn de gemeten temperaturen op 7 oktober 2020 om 13:00 opgenomen. De keuze voor dit tijdstip is arbitrair; de metingen geven een vrij constant temperatuursverloop. Figuur 3.5 geeft de metingen over een periode van 15 dagen weer de nummering van de sensoren komt overeen met Figuur 3.2.



Figuur 3.4 Gemeten temperaturen op 7 oktober 2020 13:00 in de eerste meetlocatie

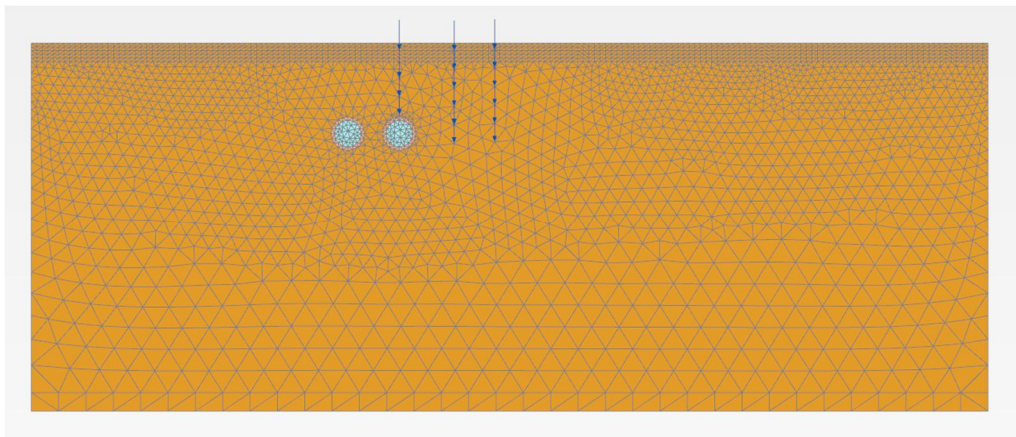


Figuur 3.5 eerste meetlocatie

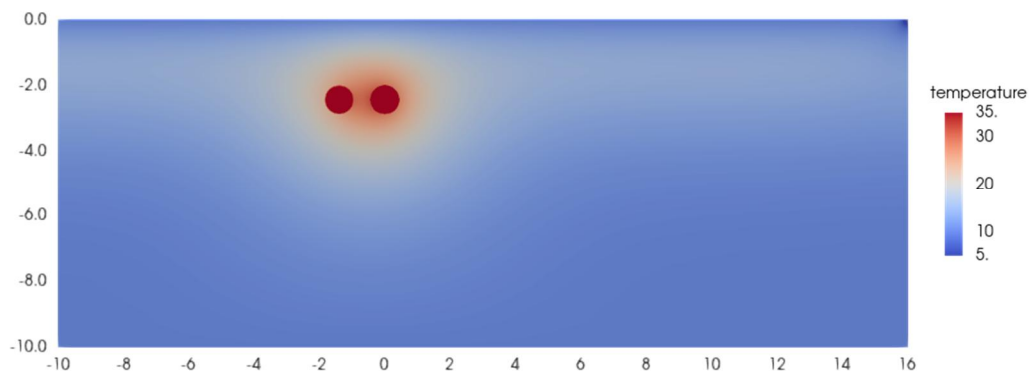
3.1.2

Berekeningen

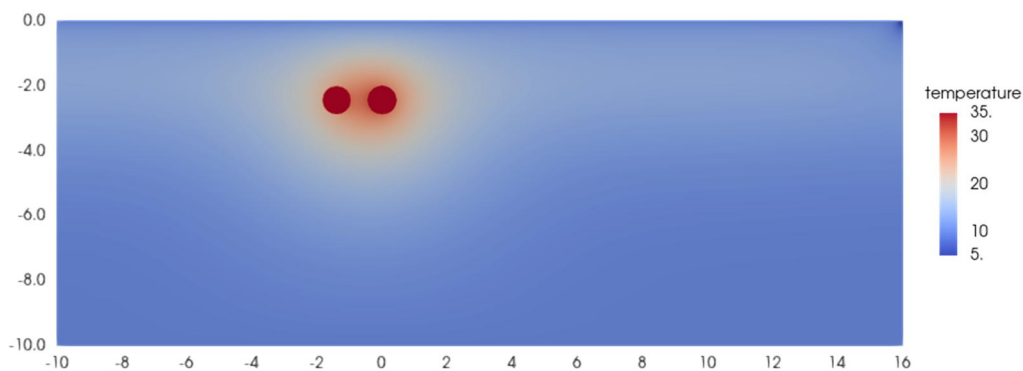
In Figuur 3.6 is het eindige elementen mesh afgebeeld waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd. Een eindige elementen pakket (zoals DgFlow) gebruikt een mesh voor de berekening; op de hoeken van de driehoekjes worden de temperatuur en de druk berekend. Figuur 3.7 en Figuur 3.8 laten het berekende temperatuursverloop zien. De temperatuur is het hoogst in de aanvoerleiding (100 C) en de retourleiding (60C), in de ondergrond neemt de temperatuur af met de afstand tot de leidingen. Aan de onderrand is een temperatuur van 10C opgelegd omdat de temperatuur op een diepte van 10 m -mv niet meer door het klimaat wordt beïnvloed. De temperatuur aan maaiveld wordt bepaald door de warmteuitstaling van de leidingen en de atmosferische condities en volgt uit de berekening. De afmeting van het model is zodanig gekozen dat de invloed van de leidingen op de temperatuur langs de verticale randen te verwaarlozen is (linker rand -10 m, rechter rand +10 m uit hart van de aanvoerleiding).



Figuur 3.6 Eindige elementen mesh eerste meetlocatie

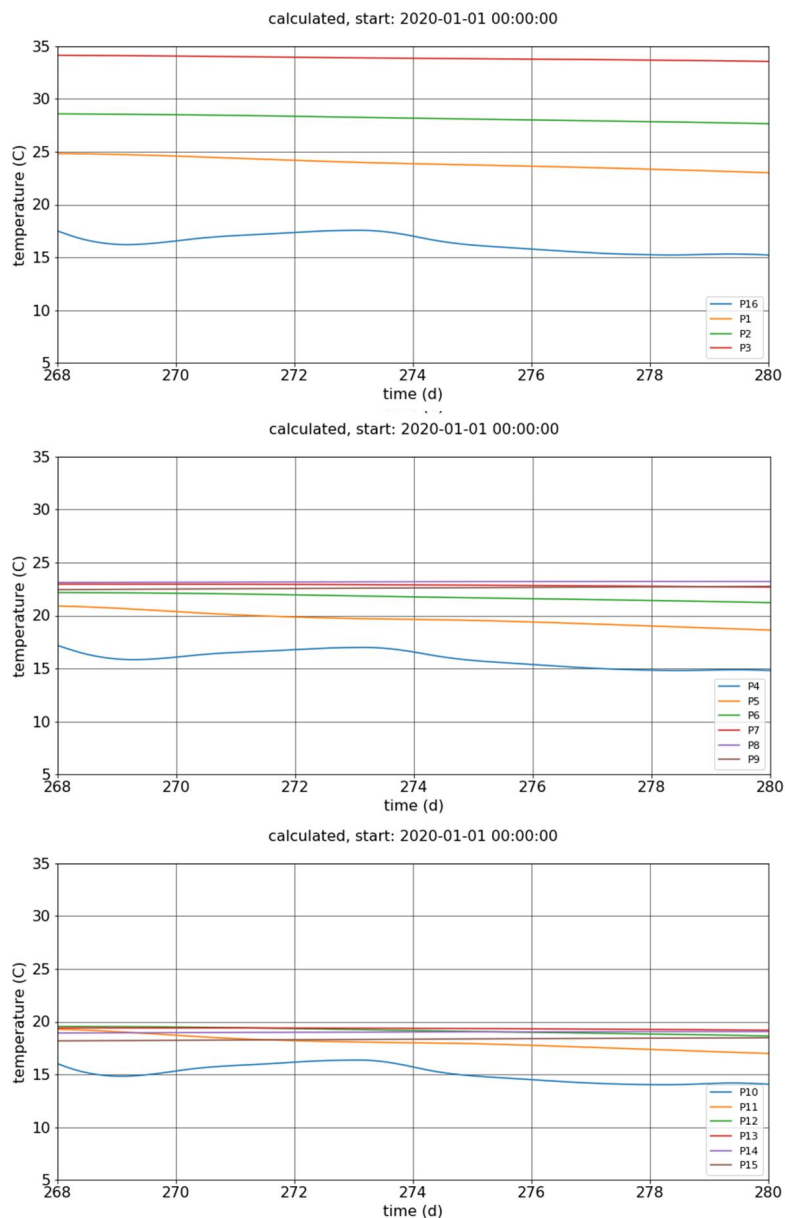


Figuur 3.7 Temperatuursverloop 7-10-2020 eerste meetlocatie



Figuur 3.8 Temperatuursverloop 17-10-2020 eerste meetlocatie

Figuur 3.9 geeft de berekende temperaturen ter plaatse van de sensoren weer. Op de horizontale as zijn de dagen (na 1 januari 2020 uitgezet) dag 268 komt overeen met 25 september 2020 en dag 280 is 7 oktober 2020.



Figuur 3.9 Berekende sensortemperaturen eerste meetlocatie

In Tabel 3.1 zijn de gemiddelde temperaturen over de meetperiode verzameld. De nummering van de sensoren is weergegeven in Figuur 3.2: meetlans 1 (sensoren 16, 1, 2 en 3), meetlans 2 (sensoren 4, 5, 6, 7, 9) en meetlans 3 (sensoren 10, 11, 12, 13, 14 en 15). In Figuur 3.4 zijn de afstanden tot het hart van de aanvoerleiding weergegeven. In de ondiepe sensoren 16, 4 en 10 zijn temperaturen van 18, 18 en 17 C gemeten waaruit zou kunnen worden opgemaakt dat de temperatuursverhoging boven de aanvoerleiding slechts 1 C bedraagt. De metingen laten echter zien dat de sensoren in meetlans 3 worden beïnvloed door de leiding en dat sensor 10 niet als referentie gezien kan worden. De berekening, waarvan de resultaten afgebeeld zijn in Figuur 3.9, onderschat de temperatuur dicht bij het maaiveld en voorspeld gemiddelde temperaturen van 16, 16 en 15 graden.

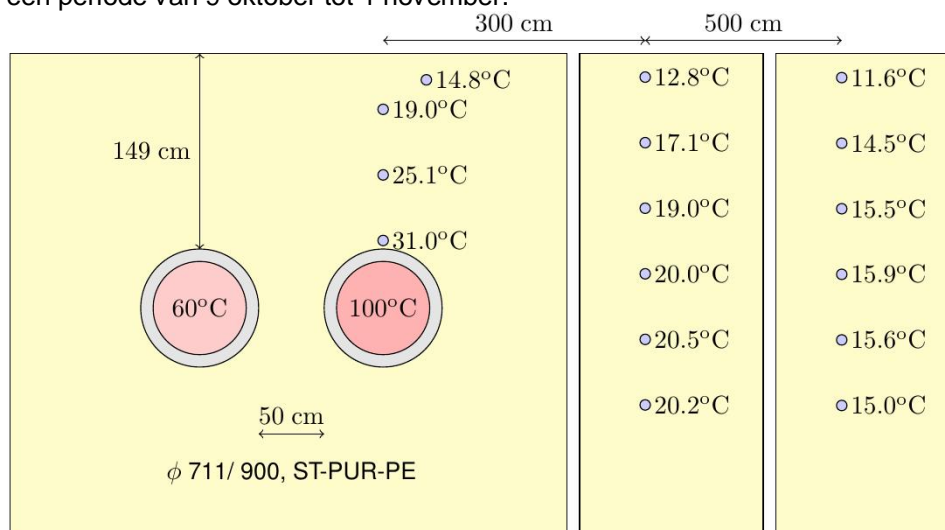
Tabel 3.1 Sensordata eerste meetlocatie

Sensor	x (m buis)	y (m-MV)	Gemeten (C)	Berekend (C)	Vershil (C)
1	0.00	-0.95	24	24	1
2	0.00	-1.45	28	28	0
3	0.00	-1.95	32	34	-1
4	1.49	-0.22	18	16	2
5	1.49	-0.72	21	20	1
6	1.49	-1.22	24	22	2
7	1.49	-1.72	25	23	3
8	1.49	-2.22	27	23	4
9	1.49	-2.72	27	23	4
10	2.59	-0.18	17	15	2
11	2.59	-0.68	19	18	1
12	2.59	-1.18	21	19	2
13	2.59	-1.68	23	19	3
14	2.59	-2.18	23	19	4
15	2.59	-2.68	23	18	5
16	0.00	-0.20	18	16	2

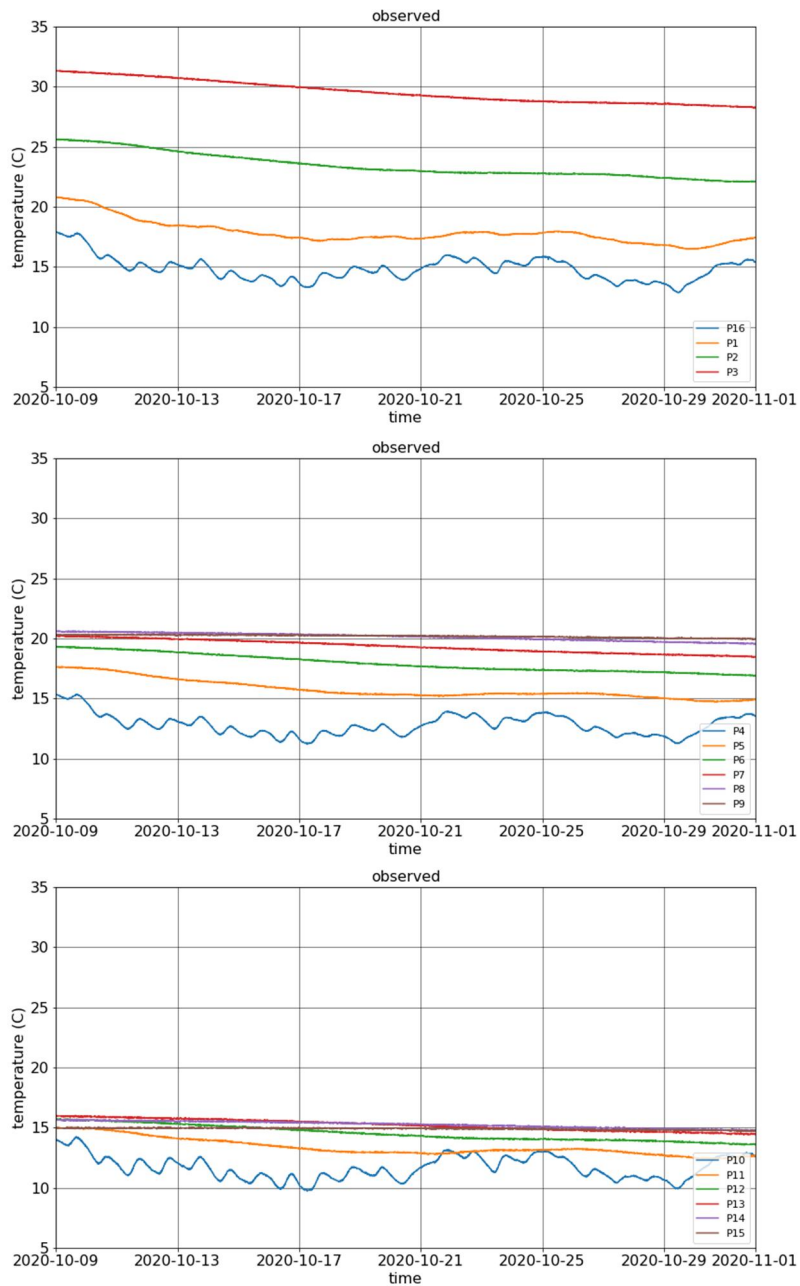
3.2 Tweede meetlocatie

3.2.1 Beschikbare gegevens

In Figuur 3.10 zijn de posities van de sensoren op de tweede meetlocatie en de ligging van de aanvoer- en retourleiding afgebeeld. In de figuur zijn de gemeten temperaturen op 11 oktober 2020 om 13:00 opgenomen. Figuur 3.11 geeft de gemeten temperaturen weer over een periode van 9 oktober tot 1 november.



Figuur 3.10 Gemeten temperaturen op 11 oktober 2020 13:00 in de tweede meetlocatie

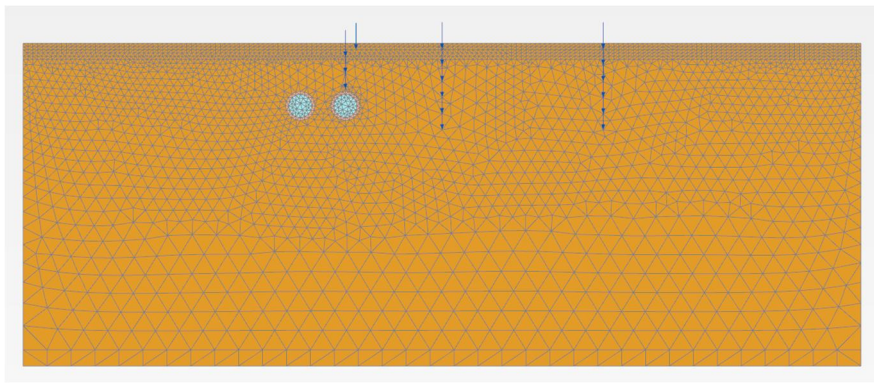


Figuur 3.11 tweede meetlocatie

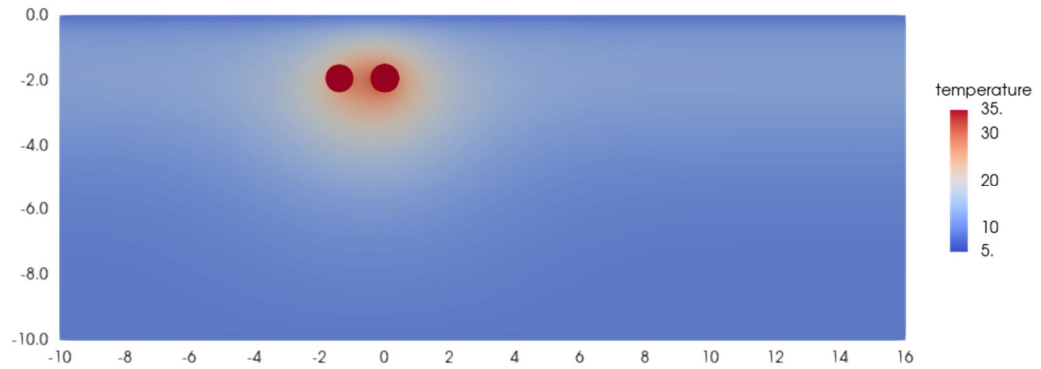
3.2.2

Berekeningen

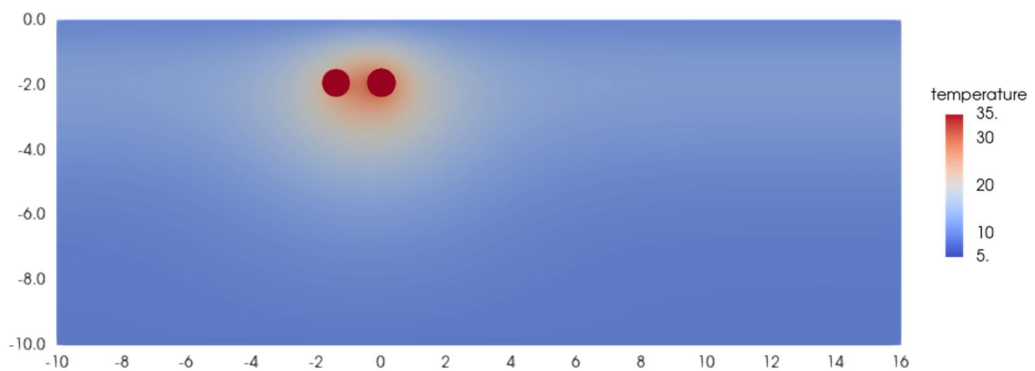
In Figuur 3.12 het eindige elementen mesh afgebeeld waarmee de berekeningen zijn uitgevoerd, Figuur 3.13 en Figuur 3.14 laat het berekende temperatuursverloop in de ondergrond op 27 oktober en 6 november zien.



Figuur 3.12 Eindige elementen mesh tweede meetlocatie

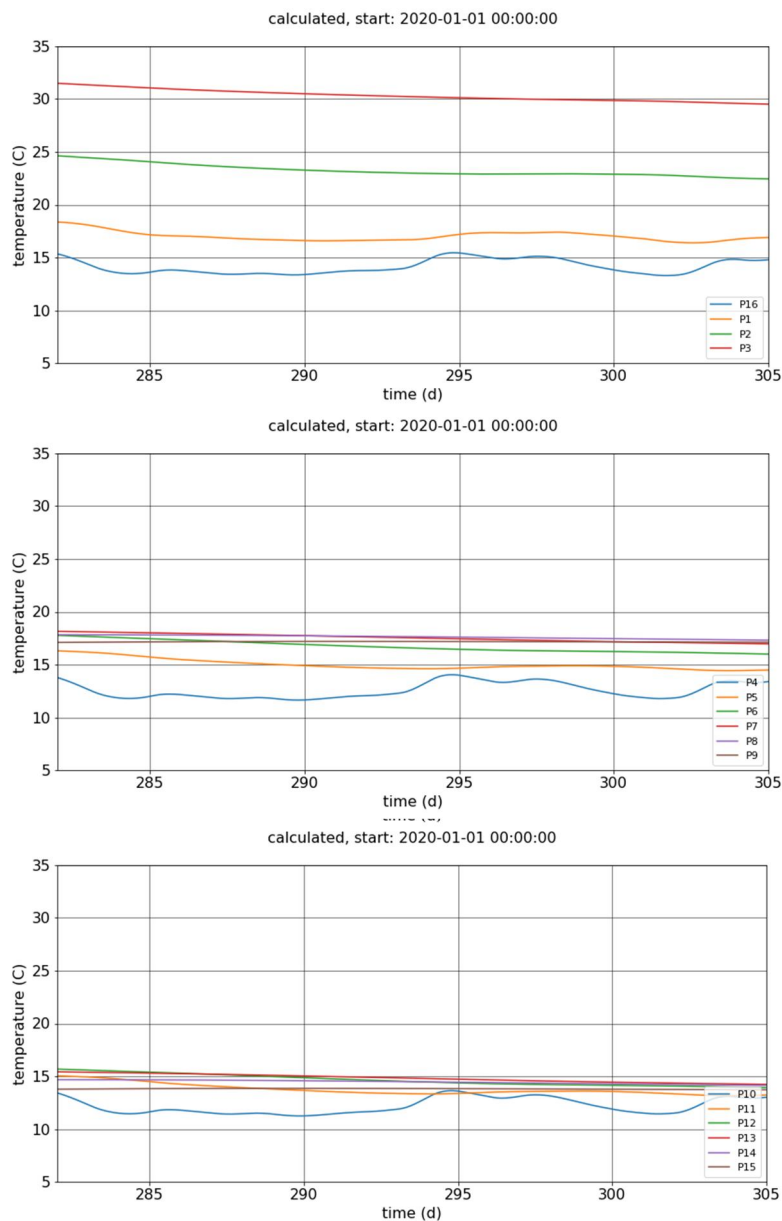


Figuur 3.13 Temperatuursverloop 27-10-2020 tweede meetlocatie



Figuur 3.14 Temperatuursverloop 6-11-2020 tweede meetlocatie

Figuur 3.15 geeft het voorspelde temperatuursverloop in de sensoren. Op de horizontale as zijn de dagen (na 1 januari 2020 uitgezet) dag 282 komt overeen met 9 oktober 2020 en dag 305 is 1 november 2020.



Figuur 3.15 Berekende sensortemperaturen tweede meetlocatie

In Tabel 3.2 zijn de gemiddelde temperaturen over de meetperiode verzameld. In Tabel 3.1 zijn de gemiddelde temperaturen over de meetperiode verzameld. De nummering van de sensoren is weergegeven in Figuur 3.2: meetlans 1 (sensoren 16, 1, 2 en 3), meetlans 2 (sensoren 4, 5, 6, 7, 9) en meetlans 3 (sensoren 10, 11, 12, 13, 14 en 15). In de ondiepe sensoren 16, 4 en 10 zijn temperaturen van 15, 13 en 12 C gemeten waaruit zou kunnen worden opgemaakt dat de temperatuursverhoging boven de aanvoerleiding 3 C bedraagt. De sensoren in meetlans 3 worden niet beïnvloed door de leiding en sensor 10 (een grotere afstand ten opzichte van locatie 1) wordt als referentie gezien. De rekenresultaten komen goed overeen met de temperatuur dicht bij het maaiveld en voorspellen gemiddelde temperaturen van 14, 13 en 12 graden.

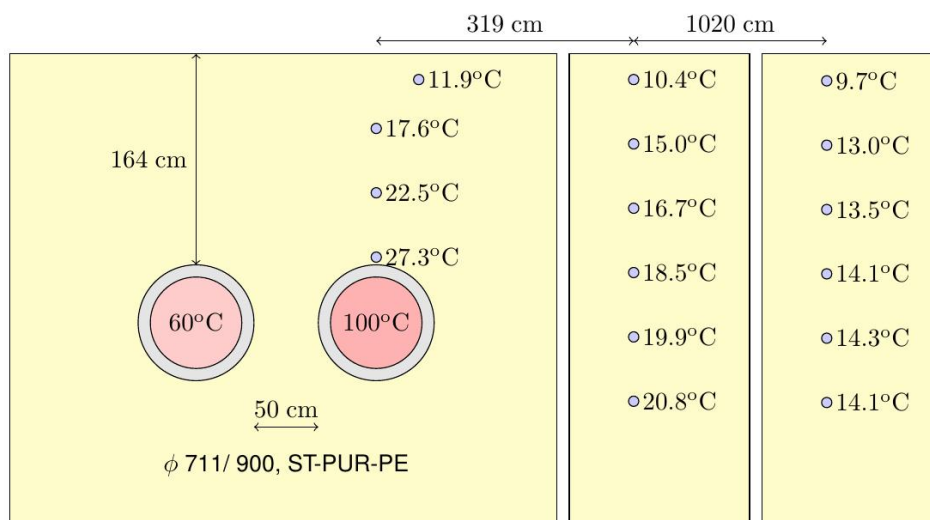
Tabel 3.2 Sensordata tweede meetlocatie

sensor	x (m buis)	y (m -mv)	gemeten (C)	berekend (C)	verschil (C)
1	0.00	-0.43	18	17	1
2	0.00	-0.93	23	23	0
3	0.00	-1.43	29	30	-1
4	3.00	-0.18	13	13	0
5	3.00	-0.68	16	15	1
6	3.00	-1.18	18	17	1
7	3.00	-1.68	19	18	2
8	3.00	-2.18	20	18	2
9	3.00	-2.68	20	17	3
10	8.00	-0.18	12	12	0
11	8.00	-0.68	13	14	0
12	8.00	-1.18	14	15	0
13	8.00	-1.68	15	15	0
14	8.00	-2.18	15	14	1
15	8.00	-2.68	15	14	1
16	0.33	-0.20	15	14	1

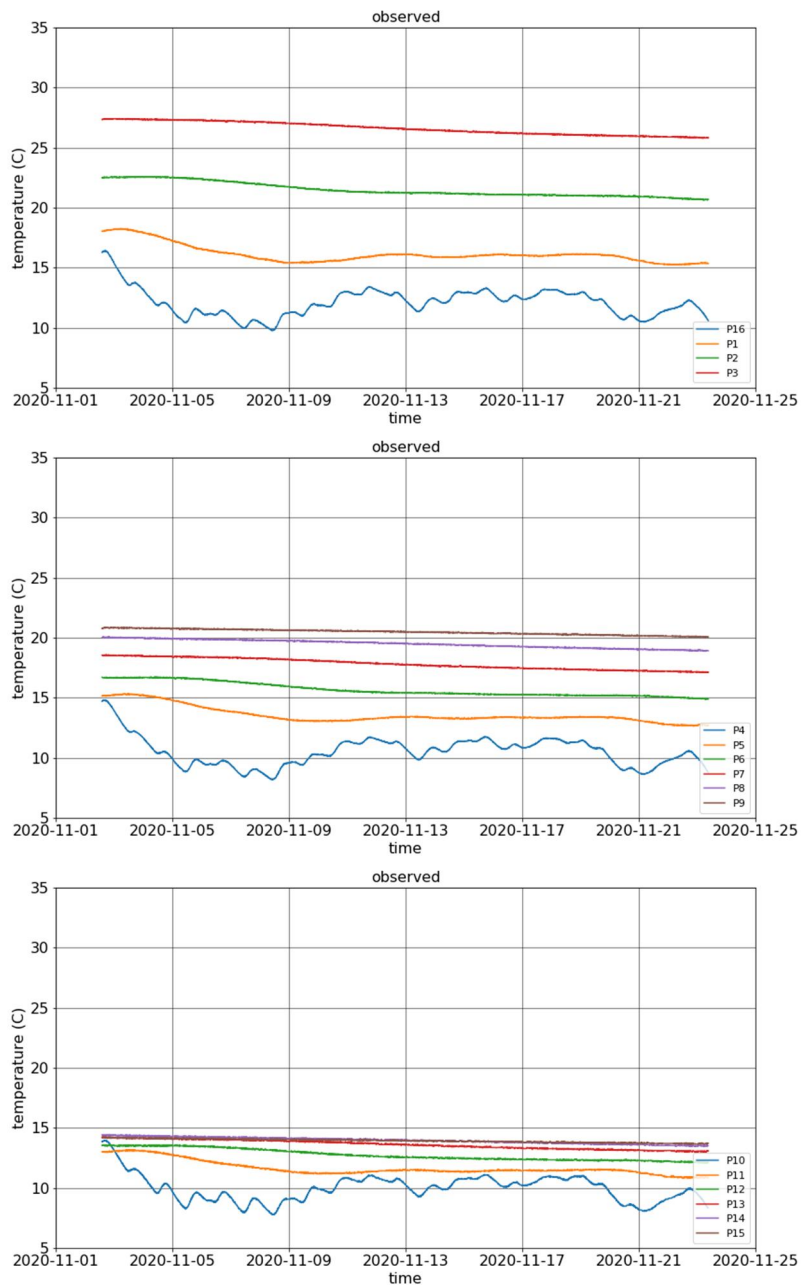
3.3 Derde meetlocatie

3.3.1 Beschikbare gegevens

In Figuur 3.16 zijn de posities van de sensoren op de derde meetlocatie en de ligging van de aanvoer- en retourleiding afgebeeld. In de figuur zijn de gemeten temperaturen op 1 november 2020 om 13:00 opgenomen. In Figuur 3.17 is het temperatuursverloop over de meetperiode van 22 dagen afgebeeld.



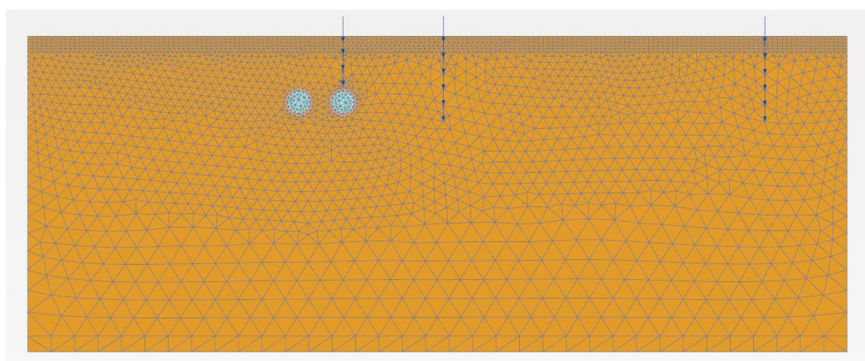
Figuur 3.16 Gemeten temperaturen op 11 november 2020 13:00 in de derde meetlocatie



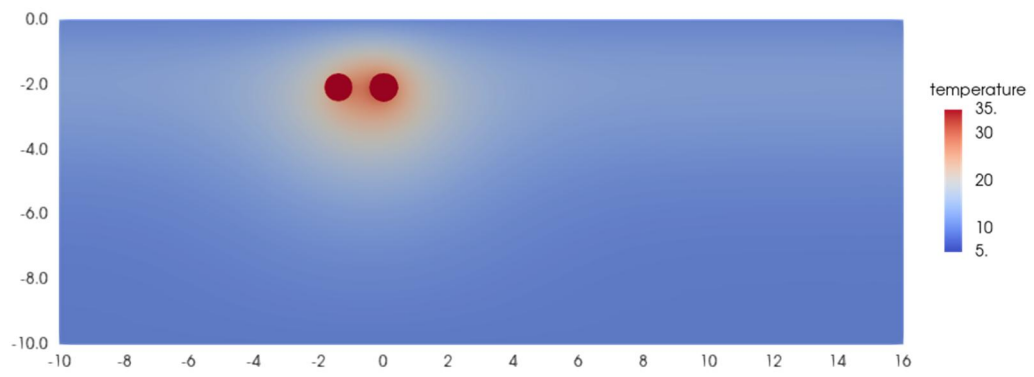
Figuur 3.17 derde meetlocatie

3.3.2 Berekeningen

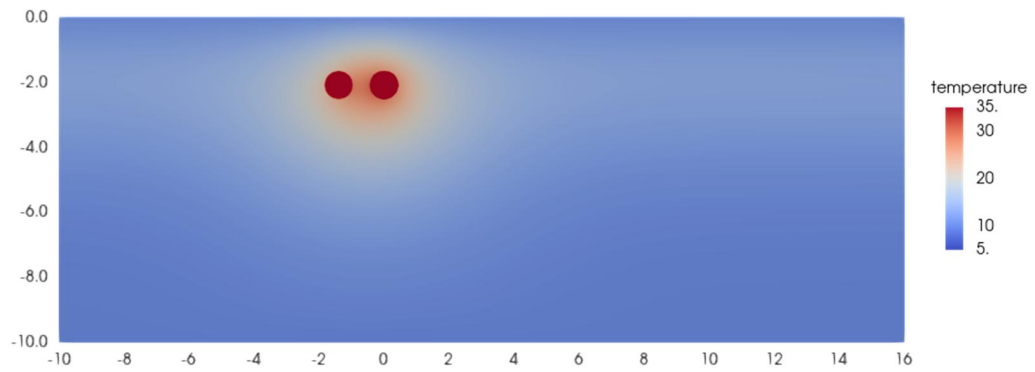
In Figuur 3.18 het eindige elementen mesh afgebeeld waarmee de berekeningen voor de derde meetlocatie zijn uitgevoerd. In Figuur 3.19 en Figuur 3.20 is de temperatuurverdeling op 7 en 17 november afgebeeld.



Figuur 3.18 Eindige elementen mesh derde meetlocatie

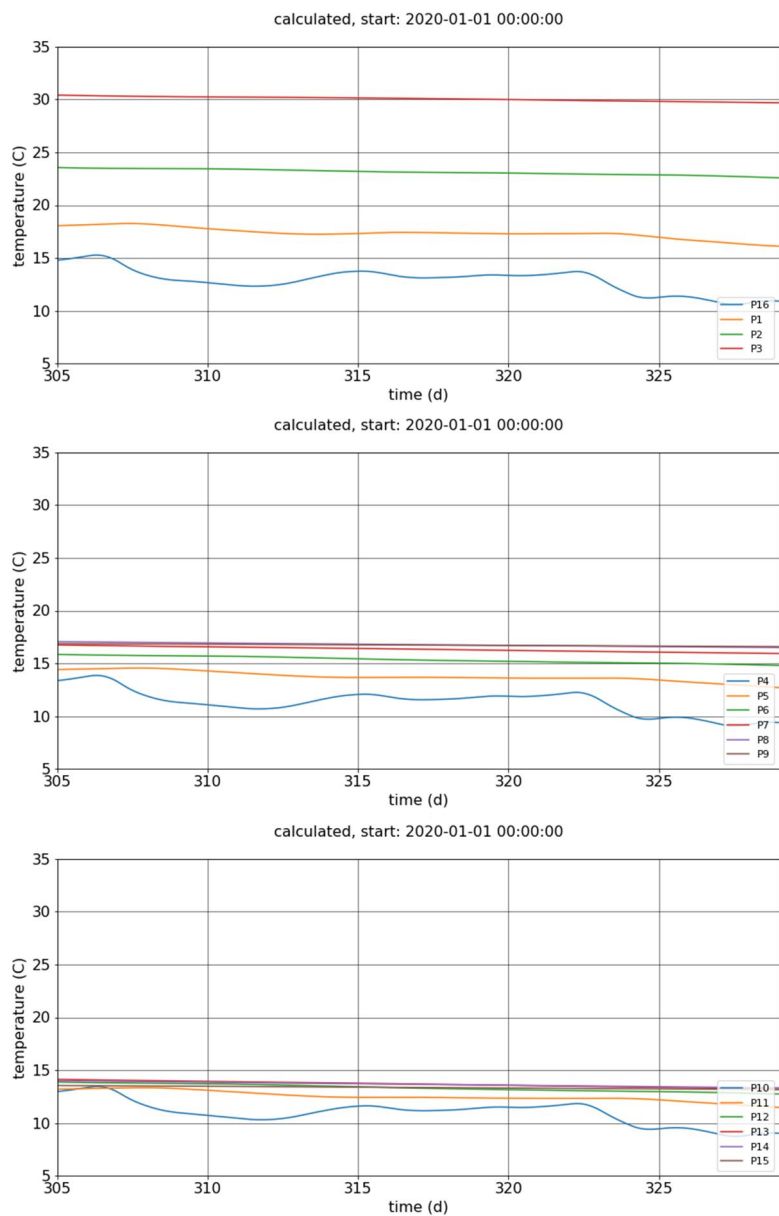


Figuur 3.19 Temperatuursverloop 7-11-2020 derde meetlocatie



Figuur 3.20 Temperatuursverloop 17-11-2020 derde meetlocatie

In Figuur 3.21 is het berekende temperatuursverloop in de sensoren voor de derde meetlocatie afgebeeld. Op de horizontale as zijn de dagen (na 1 januari 2020 uitgezet) dag 305 komt overeen met 11 november 2020 en dag 327 is 25 november 2020.



Figuur 3.21 Berekende sensortemperaturen derde meetlocatie

In Tabel 3.3 zijn de gemiddelde temperaturen over de meetperiode verzameld. In Tabel 3.1 zijn de gemiddelde temperaturen over de meetperiode verzameld. De nummering van de sensoren is weergegeven in Figuur 3.2: meetlans 1 (sensoren 16, 1, 2 en 3), meetlans 2 (sensoren 4, 5, 6, 7, 9) en meetlans 3 (sensoren 10, 11, 12, 13, 14 en 15). In de ondiepe sensoren 16, 4 en 10 zijn temperaturen van 12, 10 en 10 C gemeten waaruit zou kunnen worden opgemaakt dat de temperatuursverhoging boven de aanvoerleiding slechts 2 C bedraagt. De berekening overschatten de temperatuur dicht bij het maaiveld met slechts 1 C.

Tabel 3.3 Sensordata derde meetlocatie

Sensor	x (m buis)	y (m -mv)	Gemeten (C)	Berekend (C)	Vershil (C)
1	0.00	-0.58	16	17	-1
2	0.00	-1.08	21	23	-2
3	0.00	-1.58	27	30	-3
4	3.19	-0.20	10	11	-1
5	3.19	-0.70	14	14	0
6	3.19	-1.20	16	15	0
7	3.19	-1.70	18	16	1
8	3.19	-2.20	19	17	3
9	3.19	-2.70	20	17	4
10	13.39	-0.21	10	11	-1
11	13.39	-0.71	12	13	-1
12	13.39	-1.21	13	13	-1
13	13.39	-1.71	14	14	0
14	13.39	-2.21	14	14	0
15	13.39	-2.71	14	13	1
16	0.00	-0.20	12	13	-1

4 Leiding Vlaardingen – Den Haag

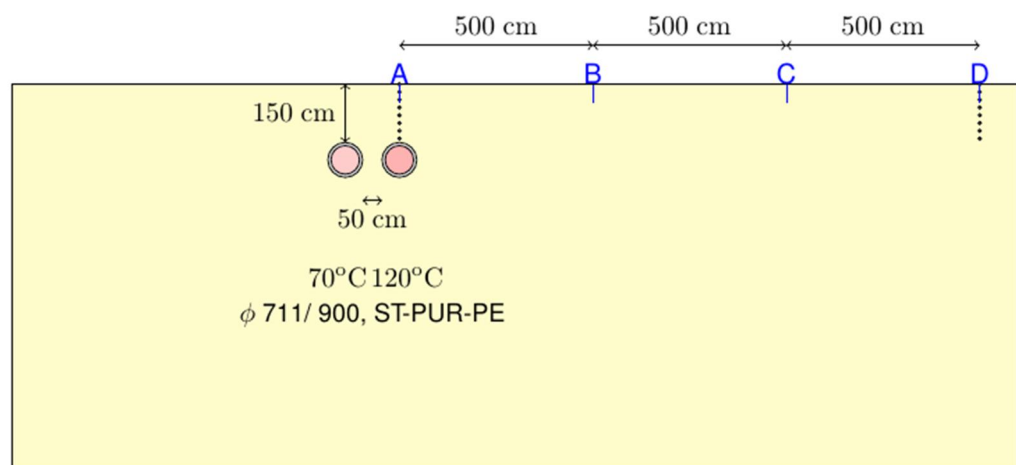
In het vorige hoofdstuk is aangetoond dat het DgFlow model goed bruikbaar is voor gedetailleerde berekeningen van het warmte gedrag. Het model is toegepast op de locaties van de geselecteerde bodem profielen. In Tabel 4.1 zijn de locaties van de geselecteerde profielen (16, 21, 31, 57.) opgenomen, in Figuur A 1 is de plaats van de profielen aangegeven. De keuze van de profielen dekt alle bodemfysische eenheden af.

Tabel 4.1 Boringen (Antea)

	x	y	Bodemfysische eenheid
16	84054.53	440076.50	101
21	83949.31	440263.60	420
31	83704.23	440787.20	201
57	83671.82	441499.60	415

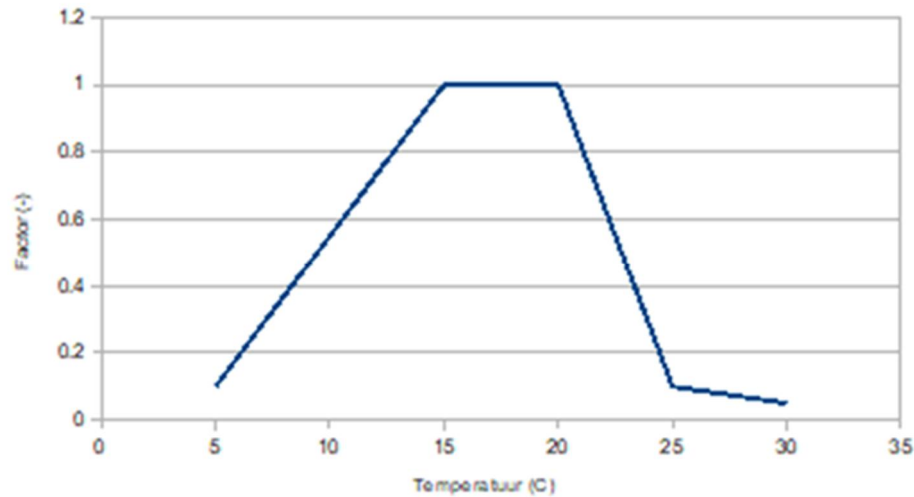
Figuur A 1 is een overzicht van de bodemfysische eigenschappen van de omgeving van de profielen afgebeeld. De bodemfysische eenheden zijn verzameld in Tabel 5.2 (eenheid 101), Tabel 5.3 (eenheid 201), Tabel 5.4 (eenheid 405), Tabel 5.5 (eenheid 415) en Tabel 5.6 (eenheid 420) van Bijlage A. Het materiaalgedrag in de onverzadigde zone is afgebeeld in Figuur A 2 (WUR). In de figuren zijn de relatieve doorlatendheid en de verzadigingsgraad uitgezet als functie van de druk. In deze studie is gerekend met de materiaalbeschrijving die de WUR hanteert.

Figuur 4.1 geeft een doorsnede van de leiding Vlaardingen – Den Haag', de gronddekking boven de leiding is 1,5 meter en de dagmaat tussen de aanvoer en de retourleiding is 0.5 meter. De temperatuur van de vloeistof in de leidingen is 120 C en 70 C. In de berekening, waarvan de resultaten hieronder worden gepresenteerd, is de temperatuur in een twintigtal meetpunten over een periode van 2 jaar verzameld. De meetpunten zijn gekozen boven de aanvoerleiding en 15 meter uit het hart van de aanvoerleiding. De effecten van de warmteleiding zijn beoordeeld op vier locaties (A, B, C en D) in een profiel met een diepte van 50 cm.



Figuur 4.1 Schematische weergave warmteleiding Vlaardingen – Den Haag

De gewasgroei is gesimuleerd met een model dat is afgeleid van de gedetailleerde grasgroei module uit het door Wageningen Environmental Research (WEnR) ontwikkelde model Swap. De parameterwaarden in deze module zijn door WEnR bepaald aan de hand van gemeten grasgroei en oogsten op verschillende proefboerderijen (o.a. in Ruurlo). Voor het huidige project is er een functie aan toegevoegd die het effect van de bodemtemperatuur op de gewasgroei beschrijft. Hierbij is uitgegaan van de veelgebruikte aanname dat gras pas begint te groeien bij bodemtemperaturen tussen de 5°C en de 8°C, dat (voor Nederlandse omstandigheden en grassoorten) de optimale gewasgroei plaatsvindt bij bodemtemperaturen tussen de 15°C en 20°C en dat bij bodemtemperaturen boven de 25°C bijna geen groei meer kan voorkomen. Deze functie is weergegeven in Figuur 4.2.



Figuur 4.2 De invloed van de bodemtemperatuur op de dagelijkse assimilatie van gras

De (berekende) bodemtemperaturen worden voor elke dag ingelezen in het model. Aan de hand van deze bodemtemperaturen en de berekende diepte van de wortelzone wordt dan met behulp van Figuur 1 voor elke positie van de wortelzone de groeifactor bepaald. Deze wordt gemiddeld over de wortelzone. Door het model wordt de dagelijkse bijgroei berekend uit de ingevoerde meteorologische gegevens. Deze bijgroei wordt verdeeld over de verschillende onderdelen van het gewas in relatie tot het ontwikkelingsstadium. Ook de worteldiepte wordt voor elke dag berekend aan de hand van de hoeveelheid aanwezig gewas.

4.1 Bodemprofiel 16

4.1.1 Beschikbare gegevens

De bodemopbouw van profiel 16 is weergegeven in Figuur B 1 en Tabel 5.7 van Bijlage B. In onderstaande tabel is deze opbouw overgenomen.

Tabel 4.2 Bodemopbouw boring 16 (Anteagroup)

Diepte (m-MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	1.45	veen	0.35
1.45	1.80	klei	0.96
1.80	2.90	veen	0.35
2.90	10.00	klei	0.96

De WUR (Wageningen University & Research) heeft aan dit profiel de bodemfysische eenheid 101 toegekend die bestaat uit venige klei tot een diepte van MV-0.15 m en mesotroof en eutroof veen tot een diepte van MV-1.20 m. Tabel 4.3 geeft de opbouw van deze bodemfysische eenheid met een zestal parameters die het verzadigd en onverzadigd materiaalgedrag kenmerken (θ_r : rest watergehalte, θ_s watergehalte hoogste verzadigingsgraad, k Darcy doorlatendheid, $g\alpha$, g_l en g_n Van Genuchten parameters)

Tabel 4.3 Bodemfysische eenheid 101 (WUR)

Laag	Dikte (cm)	Naam	θ_r (-)	θ_s (-)	k (cm/d)	$g\alpha$ (-)	g_l (-)	g_n (-)
1	15	B17	0	0.72	4.46	0.01	-0.35	1.14
2	15	O17	0	0.89	30.45	0.01	1.01	1.25
3	20	O17	0	0.89	30.45	0.01	1.01	1.25
4	70	O17	0	0.89	30.45	0.01	1.01	1.25

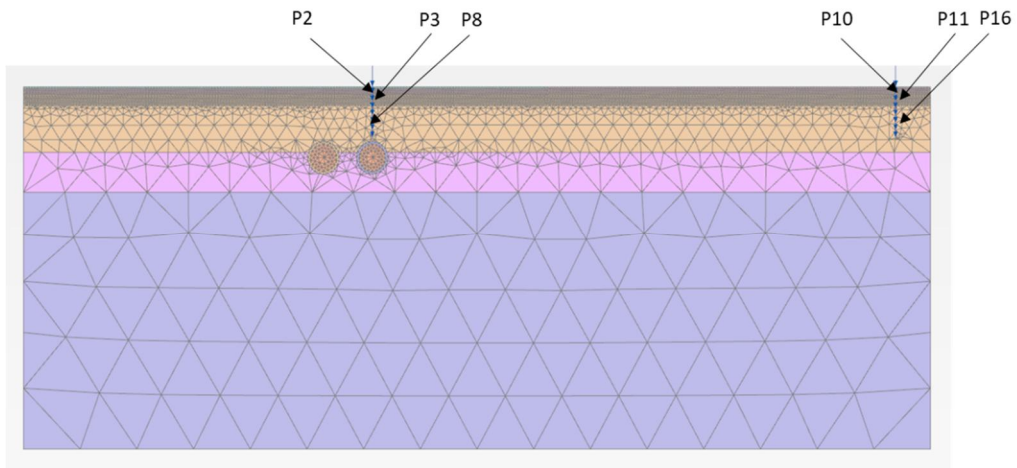
Water heeft een thermische geleidbaarheid λ^w van 0.6 W/mC, de specifieke warmtecapaciteit van water C^w bedraagt 4182 W/mC en de dichtheid ρ^w is 1000 kg/m³. Deze gegevens zijn in Tabel 4.4 gebruikt om de fysische bulkeigenschappen van de bodemeenheden te bepalen. In de tabel zijn de thermische eigenschappen verzameld van het lagenmodel dat is opgesteld voor profiel 16 (de thermische eigenschappen van de korrels zijn aangegeven met de superscript s, de bulkwaarden (korrels en bodemvocht samen) onder volledig verzadigde condities zijn aangeduid zonder superscript).

Tabel 4.4 Thermische eigenschappen profiel 16

Diepte (m)	Naam	n (-)	k (m/d)	λ^s (W/mC)	C^s (W/mC)	ρ^s (kg/m ³)	λ (W/mC)	C (W/mC)	ρ (kg/m ³)
-0.15	B17	0.72	0.45	0.50	1200	1000	0.57	3347	1000
-1.45	O17	0.89	0.30	0.35	1200	1000	0.57	3854	1000
-1.8	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675
-2.9	Peat	0.50	0.02	0.10	2091	1000	0.35	3137	1000
-10	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675

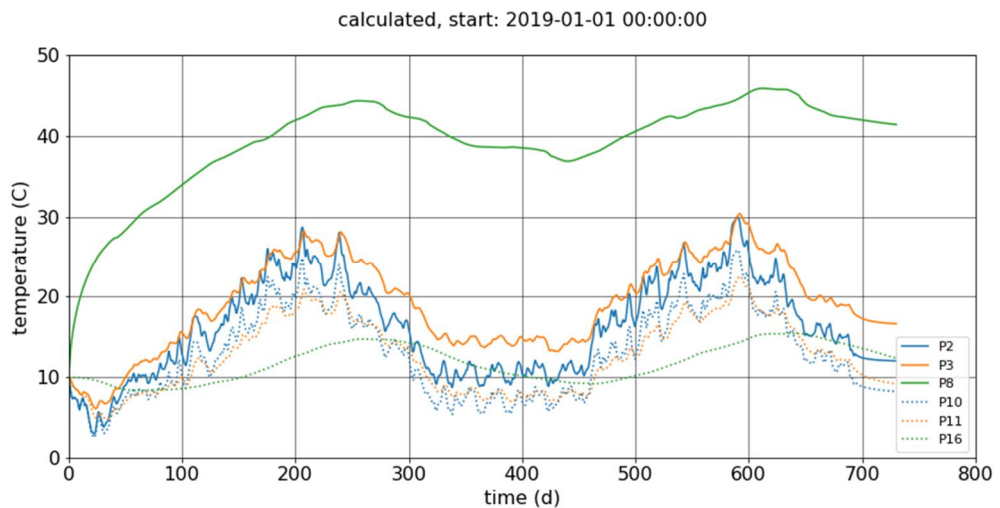
4.1.2 Warmteberekening

In Figuur 4.3 is de ondergrond schematisatie afgebeeld met het eindige elementen mesh waarmee de DgFlow berekeningen zijn uitgevoerd. In het mesh zijn twee (fictieve) meetlansen afgebeeld waarin op een aantal punten het temperatuurverloop wordt gemonitord.



Figuur 4.3 Ondergrondschematisatie profiel 16

Boven de aanvoerleiding ligt punt P2: MV– 0.2 m, P3: MV– 0.4 m, P8: MV–1.4 m (0.1 m boven bovenkant buis). De referentiemeting ligt 15 meter uit het hart van de aanvoerleiding met daarin meetpunt P10: MV– 0.2 m, P11: MV– 0.4 m, P16: MV–1.4 m. In Figuur 4.4 is het berekende tijdsafhankelijke verloop van de temperatuur in deze meetpunten afgebeeld in de periode 1 januari 2019 tot en met 31 december 2020. Het jaar 2019 is gebruikt om het model in te regelen, de effecten van de warmteleiding zijn bepaald voor het jaar 2020. Het jaar 2020 is gekozen omdat de metingen aan de leiding over Noord ook in 2020 zijn uitgevoerd en de berekende temperaturen in de wortelzone voor de leiding Vlaardingen – Den Haag eenvoudiger getoetst kunnen worden met de meetwaarden.



Figuur 4.4 Berekend temperatuursverloop profiel 16

Tabel 4.5 Berekende temperaturen jaar 2020 profiel 16

Sensor	x (m -mv)	y (m -mv)	min (C)	mean (C)	max (C)
2	0.0	-0.2	9	17	30
3	0.0	-0.4	13	20	30
8	0.0	-1.4	37	41	46
10	15.0	-0.2	5	13	26
11	15.0	-0.4	7	13	23
16	15.0	-1.4	9	12	15

Uit de berekening volgt dat de temperatuur boven de aanvoerleiding op 20 cm beneden maaiveld gemiddeld 4 graden toeneemt.

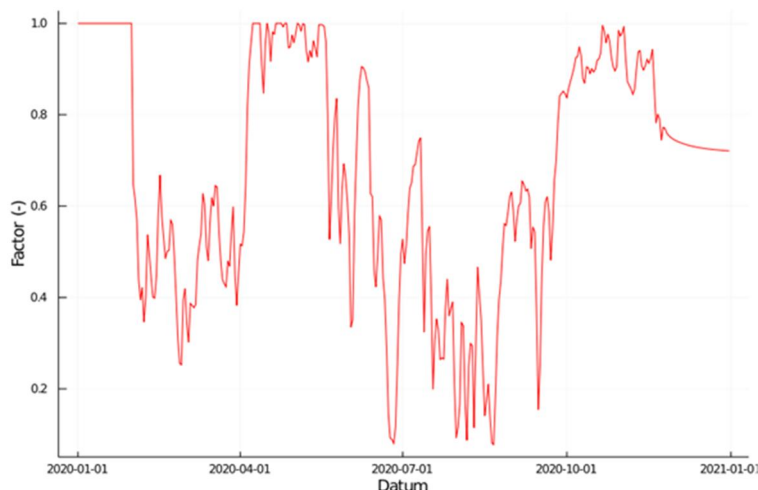
4.1.3 Effecten van de warmteleiding

In Tabel 4.6 zijn de resultaten van de effectenberekening verzameld. Uit deze tabel blijkt dat de eerste maaisnede een week is vervroegd door de hogere bodemtemperaturen in het profiel. De totale hoeveelheid gras neemt door de hogere temperaturen met 37% af boven de aanvoerleiding. Op 5 m van de warmteleidingen is de afname nog maar 0.9%.

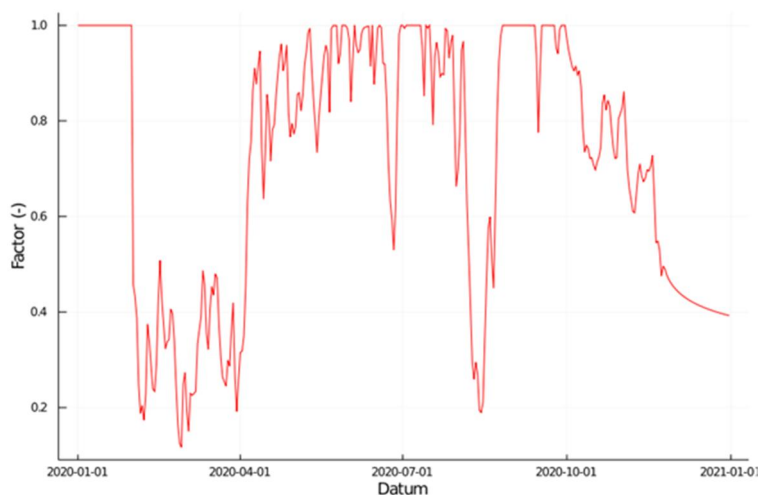
Tabel 4.6 Effecten van de warmteleiding profiel 16

Parameter / afstand	0 m	5 m	10 m	15 m
gemaaid (kg ds/ha)	8057	13338	13434	13474
gewas 15 oktober (kg ds/ha)	999	947	940	936
totaal (kg ds/ha)	9056	14285	14374	14410

De invloed van de bodemtemperatuur op de gewasgroei wordt uitgedrukt in een correctiefactor. Ter illustratie worden hieronder voor bodemprofiel 16 de berekende correctiefactoren grafisch weergegeven, zowel boven de aanvoerleiding (Figuur 4.5) als op een afstand van 15 m (Figuur 4.6). Daarbij is de dagtemperatuur gemiddeld over het interval maaiveld tot 50 cm onder maaiveld.



Figuur 4.5 Verloop correctiefactor boven de leiding



Figuur 4.6 Verloop correctiefactor 15 m naast de leiding

Uit deze figuren wordt duidelijk dat de correctiefactor boven de aanvoerleiding in het voorjaar aanzienlijk hoger ligt dan die op 15 m van de aanvoerleiding. In deze periode heeft de bodemverwarming dus een positief effect op de groei van het gras. In de zomer zien we echter het omgekeerde effect. Dan wordt de temperatuur van de bodem boven de aanvoerleiding hoger dan de optimale temperatuur en wordt de dagelijkse bijgroei van het gras gereduceerd.

4.2 Bodemprofiel 21

4.2.1 Beschikbare gegevens

De door de Anteaagroup vastgestelde bodemopbouw van profiel 21 is weergegeven in Figuur B 4 en Tabel 5.10 van Bijlage B. In Tabel 4.7 is deze opbouw overgenomen en in Tabel 4.8 is de opbouw van de bovenste laag volgens de WUR (bodempysische eenheid 420) samengevat. Deze eenheid bestaat uit lichte klei tot een diepte van MV-0.40 m, matig zware klei tot een diepte van mv. -0.70 m en lichte klei tot een diepte van MV-1.20 m.

Tabel 4.7 Bodemopbouw boring 21 (anteagroup)

Diepte (m -MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	0.90	klei	0.96
0.90	1.10	zand	1.82
1.10	2.00	veen	0.50
2.00	4.20	klei	0.96
4.20	5.20	veen	0.50
5.20	8.55	klei	0.96
8.55	8.75	veen	0.35
8.75	10.00	klei	0.96

Tabel 4.8 Bodempysische eenheid 420 (WUR)

Layer	Size	Code	ThetaR	ThetaS	KSat	alpha	l	n
1	25	B10	0	0.44	31.1	0.05	-6.55	1.12
2	15	B10	0	0.44	31.1	0.05	-6.55	1.12
3	30	O12	0	0.49	10.8	0.03	-6.74	1.11
4	50	O11	0	0.42	61	0.04	-3.7	1.12

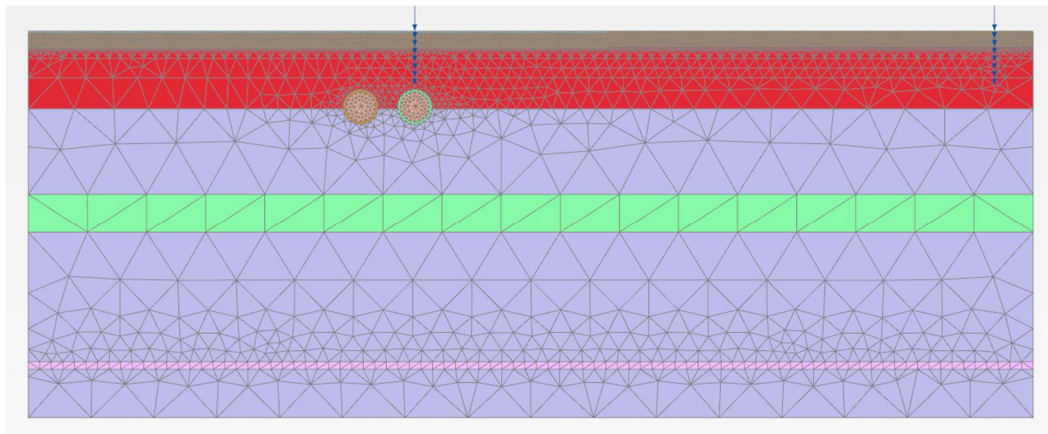
Tabel 4.9 combineert beide databronnen en geeft de laagopbouw die in de berekening is gebruikt.

Tabel 4.9 Thermische eigenschappen profiel 21

Diepte (m)	Naam	n (-)	k (m/d)	λ^s (W/mC)	C^s (W/mC)	ρ^s (kg/m ³)	λ (W/mC)	C (W/mC)	ρ (kg/m ³)
-0.4	B10	0.44	0.31	0.96	1547	2650	0.80	2150	1624
-0.7	O12	0.49	0.11	1.99	2000	2373	1.31	2629	1700
-1.2	O11	0.42	0.61	0.96	1547	2650	0.81	2113	1957
-2	PeatC	0.80	0.02	0.10	3344	1000	0.50	4014	1000
-4.2	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675
-5.2	PeatC	0.80	0.02	0.10	3344	1000	0.50	4014	1000
-8.55	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675
-8.75	Peat	0.50	0.02	0.10	2091	1000	0.35	3137	1000
-10	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675

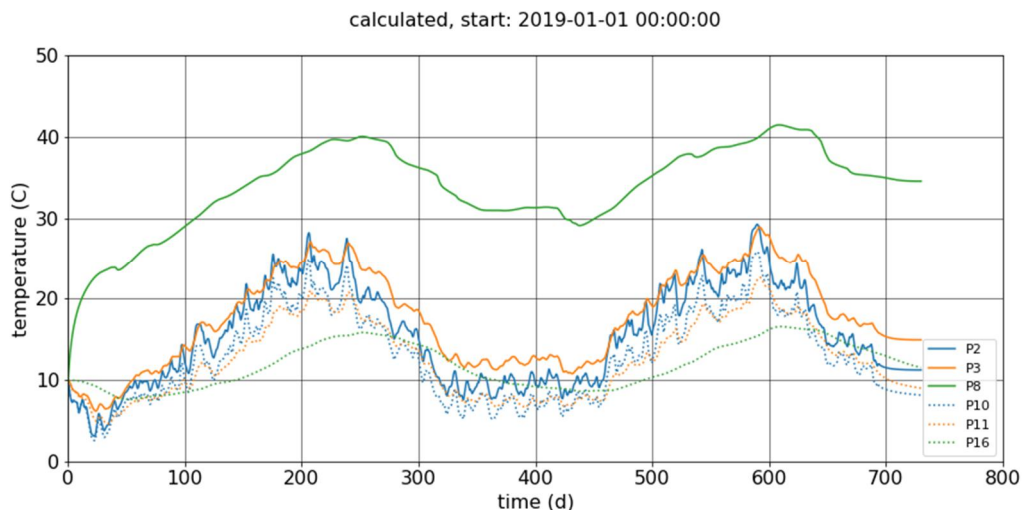
4.2.2 Warmteberekening

In Figuur 4.7 is het eindige elementen mesh afgebeeld waarmee de berekening voor profiel 21 is gemaakt.



Figuur 4.7 Ondergrondschematisatie profiel 21

Figuur 4.8 geeft de rekenresultaten weer voor een zestal sensoren: P2 (mv – 0.2 m), P3 (mv – 0.4 m) en P8 (mv – 1.4 m) boven de aanvoerleiding en referentiemetingen P10 (mv – 0.2 m), P11 (mv – 0.4 m) en P16 (mv – 1.4 m) rechts van de aanvoerleiding.



Figuur 4.8 Berekend temperatuursverloop profiel 21

Tabel 4.10 Berekende temperaturen jaar 2020 profiel 21

sensor	x (m -mv)	y (m -mv)	min (C)	mean (C)	max (C)
2	0.0	-0.2	8	16	29
3	0.0	-0.4	11	19	29
8	0.0	-1.4	29	35	41
10	15.0	-0.2	5	13	26
11	15.0	-0.4	7	13	23
16	15.0	-1.4	9	12	17

Uit de berekening volgt dat de temperatuur boven de aanvoerleiding op 20 cm beneden maaiveld gemiddeld 3 graden toeneemt.

4.2.3 Effecten van de warmteleiding

Tabel 4.11 geeft de resultaten van de berekeningen van de gewasopbrengsten voor profiel 21. Ook hier zijn de berekende verzadigingsgraad en de temperatuur in de wortelzone over het jaar 2020 in vier kolommen als invoer is gebruikt. De kolommen liggen 0m, 5m, 10m en 15 meter uit het hart van de aanvoerleiding. Als we de opbrengst op 0 m vergelijken met die van profiel 16, dan zien we dat de opbrengst hier bijna 1000 kg ds/ha hoger ligt. Dit wordt veroorzaakt door het verschil in warmtecapaciteit en warmtegeleidingsvermogen tussen de bodems. Het verschil tussen de opbrengsten van 0 m en 15 m is nu 31%, tussen de opbrengst van 5 m en die van 10 m slechts 0.7%.

Tabel 4.11 Effecten van de warmteleiding profiel 21

Parameter / afstand	0 m	5 m	10 m	15 m
gemaaid (kg ds/ha)	9099	13505	13594	13609
gewas 15 oktober (kg ds/ha)	954	890	885	885
totaal (kg ds/ha)	10053	14395	14479	14494

4.3 Bodemprofiel 31

4.3.1 Beschikbare gegevens

De bodemopbouw van profiel 31 is weergegeven in Figuur B 3 en Tabel 5.9 van Bijlage B. In Tabel 4.12 is de beschrijving van het bodemprofiel volgens Anteagroup samengevat, Tabel 4.13 bevat een beschrijving van de bodemfysische eenheid die door de WUR aan dit profiel is toegekend. De bodemfysische eenheid 201 bestaat uit venige klei tot een diepte van MV-0.20 m, een moerassige tussenlaag tot een diepte van MV-0.30 m en matig zware klei tot een diepte van MV-1.20 m.

Tabel 4.12 Bodemopbouw boring 31 (anteagroup)

Diepte (m -MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	1.00	klei	0.96
1.00	1.20	klei	1.13
1.20	2.30	klei	0.96
2.30	4.00	klei	1.13
4.00	4.70	klei	0.96
4.70	5.00	veen	0.35
5.00	10.00	klei	0.96

Tabel 4.13 Bodemfysische eenheid 201 (WUR)

Layer	size	Code	ThetaR	ThetaS	KSat	alpha	l	n
1	20	B17	0	0.72	4.46	0.01	-0.35	1.14
2	10	O18	0.01	0.57	34.45	0.01	-1.2	1.32
3	40	O12	0	0.49	10.8	0.03	-6.74	1.11
4	50	O12	0	0.49	10.8	0.03	-6.74	1.11

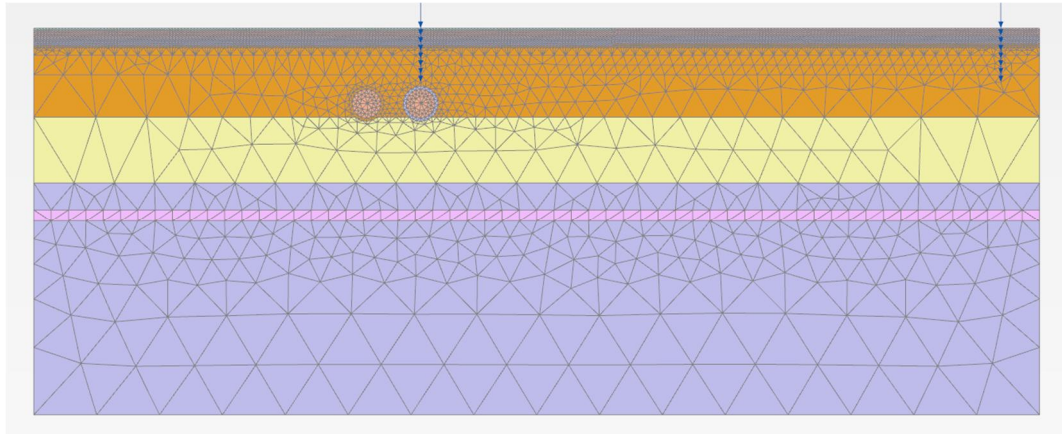
In Tabel 4.14 is de bodemopbouw samengevat en zijn thermische eigenschappen toegekend.

Tabel 4.14 Thermische eigenschappen profiel 31

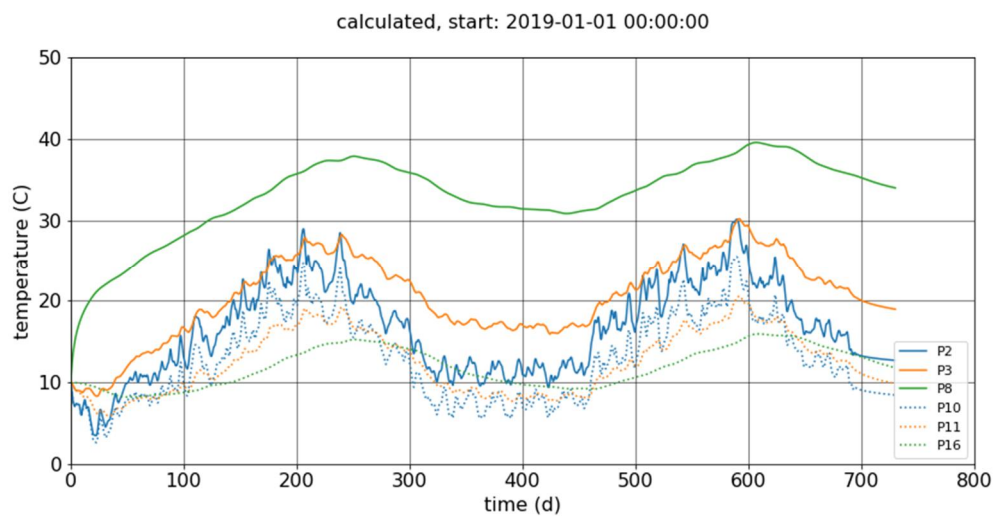
Diepte (m)	naam	n (-)	k (m/d)	λ^s (W/mC)	C^s (W/mC)	ρ^s (kg/m ³)	λ (W/mC)	C (W/mC)	ρ (kg/m ³)
-0.2	B17	0.72	0.45	0.50	1200	1000	0.57	3347	1000
-0.4	O18	0.57	0.34	0.35	1200	1000	0.49	2900	1000
-1.2	O12	0.49	0.11	1.99	2000	2373	1.31	2629	1700
-2.3	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675
-4	Clay	0.50	0.01	1.66	1547	2350	1.13	2334	1675
-4.7	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675
-5	Peat	0.50	0.02	0.10	2091	1000	0.35	3137	1000
-10	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675

4.3.2 Warmteberekening

Het eindige elementen mesh is afgebeeld in Figuur 4.9 en Figuur 4.10 bevat de uitkomsten van de berekening waarbij de sensorpunten gelijk gekozen zijn als in eerdere berekeningen.



Figuur 4.9 Ondergrondschematisatie profiel 31.



Figuur 4.10 Berekend temperatuursverloop profiel 31.

Tabel 4.15 Berekende temperaturen jaar 2020 profiel 31.

Sensor	x (m -mv)	y (m -mv)	min (C)	mean (C)	max (C)
2	0.0	-0.2	9	17	30
3	0.0	-0.4	16	22	30
8	0.0	-1.4	31	35	40
10	15.0	-0.2	6	13	25
11	15.0	-0.4	8	13	21
16	15.0	-1.4	9	12	16

Uit de berekening volgt dat de temperatuur boven de aanvoerleiding op 20 cm beneden maaiveld gemiddeld 4 graden.

4.3.3 Effecten van de warmteleiding

Ook bij dit profiel is de totale droge stof opbrengst boven de aanvoerleiding het laagste en wel 31% lager (afname) dan op 15 m afstand van de leiding. Op 5m afstand van de aanvoerleiding is de afname nog maar 0.5%. Tabel 4.16 vat de resultaten samen.

Tabel 4.16 Effecten van de warmteleiding profiel 31.

Parameter / afstand	0 m	5 m	10 m	15 m
gemaaid (kg ds/ha)	7893	13376	13438	13466
gewas 15 oktober (kg ds/ha)	1028	1074	1060	1059
totaal (kg ds/ha)	8921	14450	14498	14525

4.4 Bodemprofiel 57

4.4.1 Beschikbare gegevens

De bodemopbouw van profiel 57 is weergegeven in Figuur B 2 en Tabel 5.8 van Bijlage B. In Tabel 4.17 is de bodemopbouw samengevat en Tabel 4.18 beschrijft bodemfysische eenheid 415 die aan het profiel is toegekend. De eenheid bestaat uit matig zware klei tot een diepte van MV-0.60 m en lichte klei tot een diepte van MV-1.20 m.

Tabel 4.17 Bodemopbouw boring 57 (Anteagroup)

Diepte (m -MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	0.35	klei	0.96
0.35	0.65	veen	0.50
0.65	1.35	veen	0.35
1.35	2.80	klei	0.96
2.80	3.00	veen	0.35
3.00	3.30	veen	0.50
3.30	6.90	klei	0.96
6.90	7.15	veen	0.35

Tabel 4.18 Bodemfysische eenheid 415 (WUR)

Layer	Size	Code	ThetaR	ThetaS	KSat	alpha	l	n
1	25	B11	0	0.51	63.6	0.15	-8.06	1.09
2	35	O12	0	0.49	10.8	0.03	-6.74	1.11
3	30	O11	0	0.42	61	0.04	-3.7	1.12
4	30	O11	0	0.42	61	0.04	-3.7	1.12

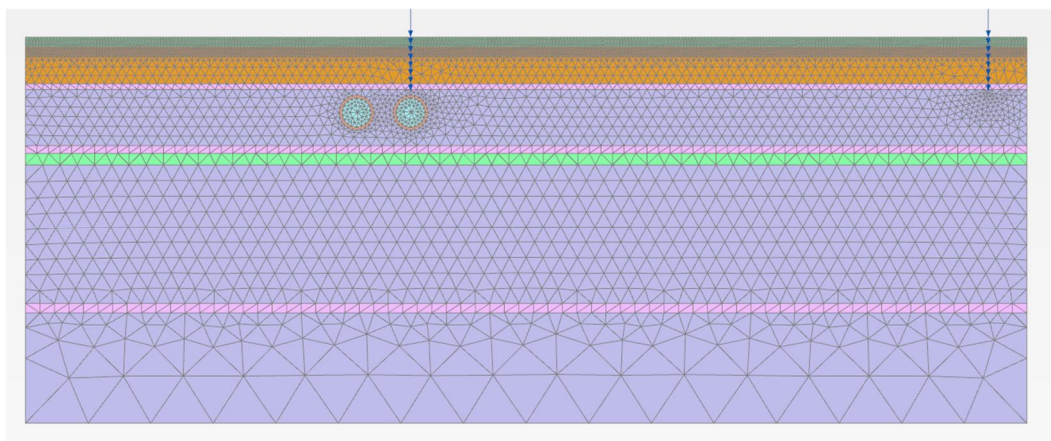
Tabel 4.19 geeft de ondergrond schematisatie die in de berekening is gebruikt.

Tabel 4.19 Thermische eigenschappen profiel 57

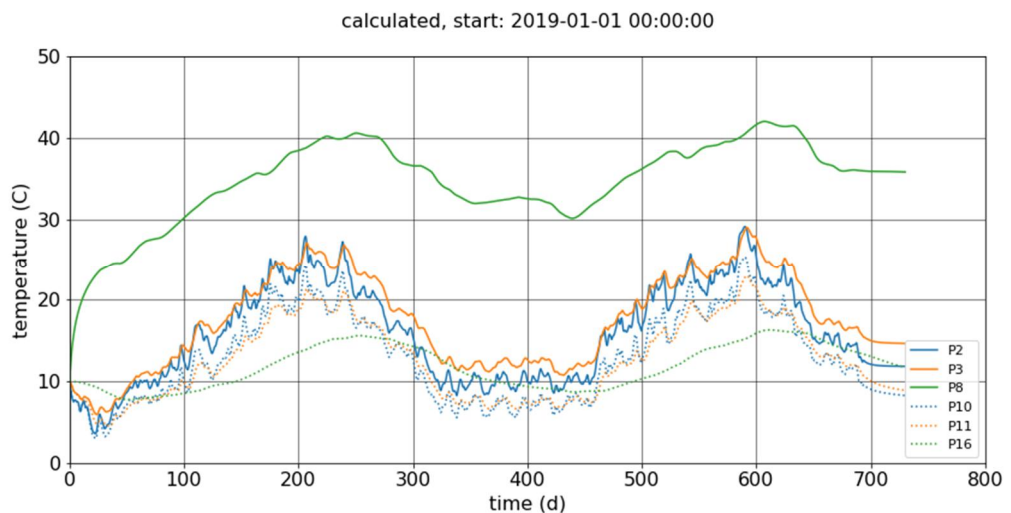
Diepte (m)	Naam	n (-)	k (m/d)	λ^s (W/mC)	C^s (W/mC)	ρ^s (kg/m ³)	λ (W/mC)	C (W/mC)	ρ (kg/m ³)
-0.25	B11	0.51	0.64	0.96	1547	2650	0.78	2290	1809
-0.6	O12	0.49	0.11	1.99	2000	2373	1.31	2629	1700
-1.2	O11	0.42	0.61	0.96	1547	2650	0.81	2113	1957
-1.35	Peat	0.50	0.02	0.10	2091	1000	0.35	3137	1000
-2.8	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675
-3	Peat	0.50	0.02	0.10	2091	1000	0.35	3137	1000
-3.3	Peat	0.80	0.02	0.40	3344	1000	0.50	4014	1000
-6.9	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675
-7.15	Peat	0.50	0.02	0.10	2091	1000	0.35	3137	1000
-10	Clay	0.50	0.01	1.32	1547	2350	0.96	2334	1675

4.4.2 Warmteberekening

Het eindige elementen mesh voor profiel 57 is afgebeeld in Figuur 4.11 en de rekenresultaten zijn weergegeven in Figuur 4.12. Het temperatuursverloop is in dezelfde punten gemonitord als in eerdere berekeningen.



Figuur 4.11 Ondergrondschematisatie profiel 57



Figuur 4.12 Berekend temperatuursverloop profiel 57

Tabel 4.20 Berekende temperaturen jaar 2020 profiel 57

Sensor	x (m -mv)	y (m -mv)	min (C)	mean (C)	max (C)
2	0.0	-0.2	8	17	29
3	0.0	-0.4	11	18	29
8	0.0	-1.4	30	36	42
10	15.0	-0.2	6	13	25
11	15.0	-0.4	7	13	23
16	15.0	-1.4	9	12	16

Uit de berekening volgt dat de temperatuur boven de aanvoerleiding in de wortelzone op 20 cm beneden maaiveld gemiddeld 3 graden toeneemt.

4.4.3 Effecten van de warmteleiding

Evenals bij de vorige profielen is het hier duidelijk dat de positie boven de aanvoerleiding de grootste vermindering van gewasopbrengst heeft. Deze is 31% lager dan die op 15 m van de leiding. Ook hier is het effect van de leiding na 5 m al nauwelijks meer te merken met een opbrengstverlies van 0.5%. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 4.21.

Tabel 4.21 Effecten van de warmteleiding profiel 57

Parameter / afstand	0 m	5 m	10 m	15 m
gemaaid (kg ds/ha)	8997	13517	13604	13614
gewas 15 oktober (kg ds/ha)	990	917	912	912
totaal (kg ds/ha)	9987	14434	14516	14526

5 Conclusies en aanbevelingen

Met het in dit project doorontwikkelde eindige elementen programma DgFlow kunnen thermisch en hydrologisch gekoppelde berekeningen worden uitgevoerd bij verschillende atmosferische omstandigheden. Het model is gevalideerd met warmtemetingen die zijn uitgevoerd in Vlaardingen rond de leiding over Noord van Eneco waarbij de atmosferische condities (lucht temperatuur, neerslag, straling, windsnelheid en vochtigheid) van het KNMI weerstation Rotterdam zijn gebruikt.

De veldmetingen, ter plaatse van de Eneco warmteleiding, geven een goed beeld van de temperatuursverdeling rond de warmteleidingen. Figuur 5.1 geeft een indruk van de meetopstelling en toont de dataloggers. Uit de metingen is een temperatuursverhoging van ongeveer 3 graden op een diepte van 20 cm beneden maaiveld boven de warmteleiding afgeleid. De gemeten temperatuur is daarvoor vergeleken met de temperatuur op een referentie locatie verder weg van de leiding.



Figuur 5.1 Meetlocatie Vlaardingen

De validatieberekeningen laten zien dat de temperatuurtoename door de aanwezigheid van de warmteleidingen goed worden voorspeld met het opgestelde rekenmodel. De temperatuursverhoging die wordt gevonden is eveneens bijna 3 graden. Wel onderschat de eerste berekening de absolute sensortemperaturen met 2 graden en overschat de derde berekening de absolute waarde met een zelfde temperatuurverschil. De tweede berekening is leidend geweest in de modelkalibratie en komt daarom het best overeen met de gemeten waarden (zonder absoluut temperatuurverschil). De heterogeniteit van de ondergrond is de waarschijnlijkste oorzaak van de verschillen in absolute temperatuur.

Uit metingen en berekeningen blijkt dat de invloed van de atmosferische condities op de temperatuur in de ondergrond tot een diepte van ongeveer drie meter diepte reikt. De modelberekeningen laten verder zien dat het belangrijk is om de ontwikkeling van de onverzadigde zone en de invloed van de zone op de indringing van de temperatuur aan het oppervlak goed mee te nemen. Ook mag de uitstraling van de warmtebronnen in de bodem naar het oppervlak, bij het berekenen van de temperatuur aan maaiveld, niet worden verwaarloosd.

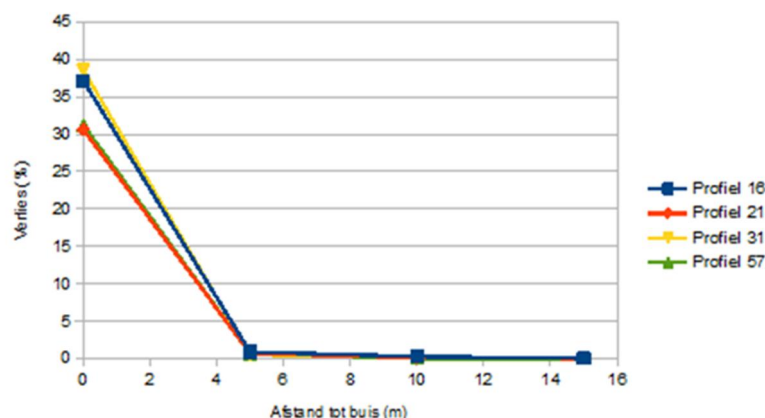
De berekeningen die zijn uitgevoerd om de effecten op het gewas langs de warmteleiding Vlaardingen – Den Haag te bepalen zijn uitgevoerd met een hogere temperatuur van de vloeistof in de leiding dan de temperatuur die gemeten is in de warmteleiding over Noord van Eneco. Als gevolg daarvan geven de berekeningen een hogere, maar beperkte, warmtetoename boven de aanvoerleiding op 20 cm beneden maaiveld dan de gemeten temperatuur boven de Eneco leiding. De warmtetoename in de onderzochte profielen bedraagt volgens de berekeningen ongeveer 4 graden. De voorspelling is daarmee conform de verwachting op basis van eerder uitgevoerde metingen.

Voor de gewasgroei zijn berekeningen gedaan met de gewasgroeimodule van het model Swap die ten behoeve van het huidige project is uitgebreid met een module die de invloed van de bodemtemperatuur op de gewasgroei berekend. Met dit aangepaste model is de gewasopbrengst voor vier bodemprofielen op vier afstanden van de aanvoerleiding (0 m, 5 m, 10 m en 15 m) bepaald. In Tabel 5.1 is de totale hoeveelheid gras in kilogram droge stof per hectare voor elk bodemprofiel (16, 21, 31 en 57) gegeven. Dit is de som van de gemaaide hoeveelheid en de hoeveelheid die op 15 oktober nog op het veld staat.

Tabel 5.1 Gewasopbrengst.

Bodem profiel	Opbrengst (kg ds.ha ⁻¹)			
	0 m	5 m	10 m	15 m
16	9056	14285	14374	14410
21	10053	14395	14479	14494
31	8921	14450	14498	14525
57	9987	14434	14516	14526

Met behulp van deze opbrengsten kan het percentage verlies van de gewasopbrengst door verwarming op eenvoudige wijze worden berekend als de locatie op 15 m van de aanvoerleiding als "onverwarmd" wordt beschouwd. De aanname is gerechtvaardigd omdat de verschillen tussen 10 m en 15 m zijn zeer gering zijn (resp. 36, 15, 27 en 10 kg ds.ha⁻¹). De opbrengstverliezen als functie van de afstand tot aan de as van de aanvoerleiding voor de vier beschouwde bodemprofielen zijn afgebeeld in Figuur 5.2.

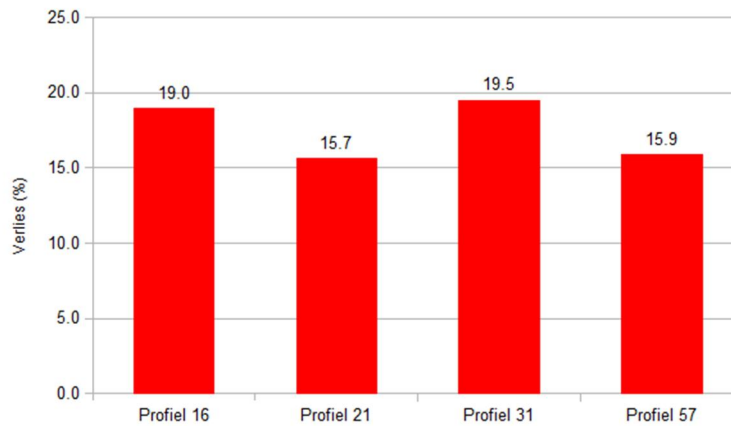


Figuur 5.2 Opbrengstverliezen als functie van de afstand tot de as van de aanvoerleiding

Uit Tabel 5.1 en Figuur 5.2 blijkt dat bij profiel 16 de totale hoeveelheid gras door de hogere bodemtemperaturen met 37% afneemt boven de aanvoer vergeleken met de opbrengsten op grotere afstand van de leiding. Voor profiel 21 is dit 30%. Het verschil tussen de

bodemprofielen wordt veroorzaakt door het verschil in warmtecapaciteit en warmtegeleidingsvermogen tussen de bodems. Bij de profielen 31 en 57 is de totale opbrengst boven de aanvoerleiding het laagste en wel respectievelijk 39% en 31% lager dan op 15 m afstand van de aanvoerleiding. In alle gevallen zijn de opbrengstverliezen op 5 m afstand van de leiding al kleiner dan 1%.

De opbrengstverliezen voor de vier beschouwde profielen kunnen ook in een strook van 5 m links tot 5 m rechts van de warmteleidingen worden berekend. In Figuur 5.3 zijn de resultaten van deze berekening afgebeeld. Hieruit blijkt dat het grootste verlies in deze strook 19.5% is voor profiel 31. Het laagste verlies is 15.7% bij profiel 21. Gemiddeld over de vier profielen is het verlies 17.5%.



Figuur 5.3 Opbrengstverliezen voor een strook van 5 m aan weerszijde van de warmteleidingen

Referenties

Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M.

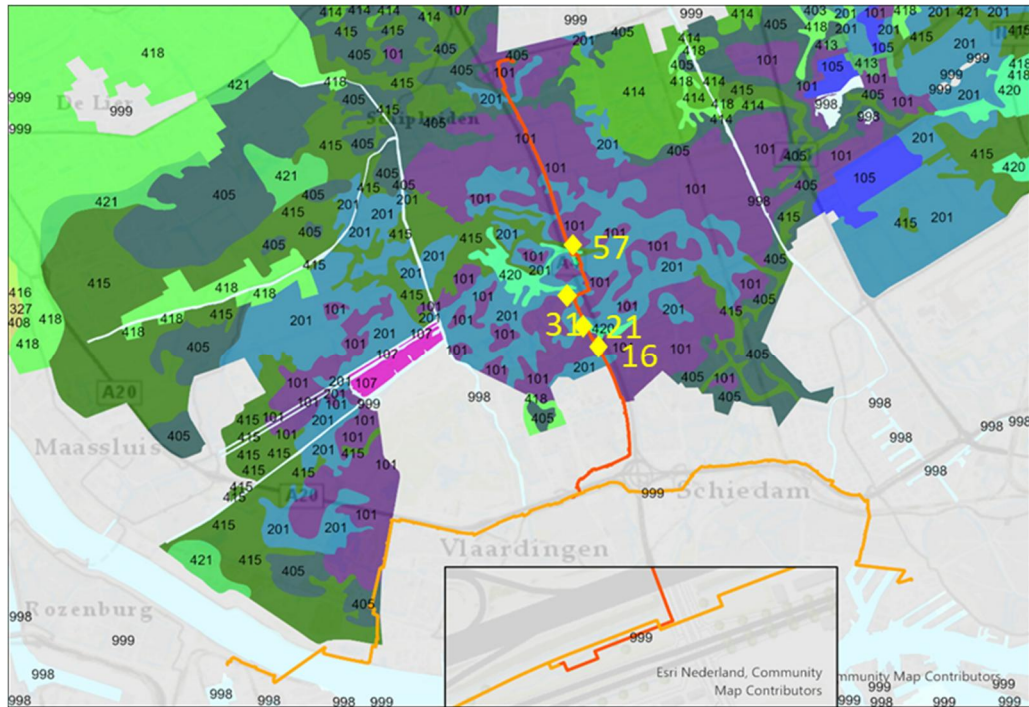
Mulder, I. Supit, P.E.V. van Walsum, 2017. SWAP version 4; Theory description and user manual.

Wageningen, Wageningen Environmental Research, Report 2780. 244 pp.; 57 fig.; 17 tab.; 312 ref.

J.M. van Esch, Deltares, Heat supply pipelines in agricultural areas; heat transfer model validation, 11205411-001-GEO-001, 2021, Delft.

H. Koopmans, AlteaGroup, Warmteoverdracht in agrarische percelen; warmteleiding door het Midden, projectnummer 437129, 2019, Rotterdam.

A Bodemfysische eenheden



Figuur A 1 Bodemfysische eenheden (WUR).

Tabel 5.2 Bodemfysische eenheid 101 (WUR)

0.00	Bouwsteen	Omschrijving
0.15	B17	venige klei
0.30	O17	mesotroof en eutroof veen
0.50	O17	mesotroof en eutroof veen
1.20	O17	mesotroof en eutroof veen

Tabel 5.3 Bodemfysische eenheid 201 (WUR)

0.00	Bouwsteen	Omschrijving
0.20	B17	venige klei
0.30	O18	moerassige tussenlaag
0.70	O12	matig zware klei
1.20	O12	venige klei

Tabel 5.4 Bodemfysische eenheid 405 (WUR)

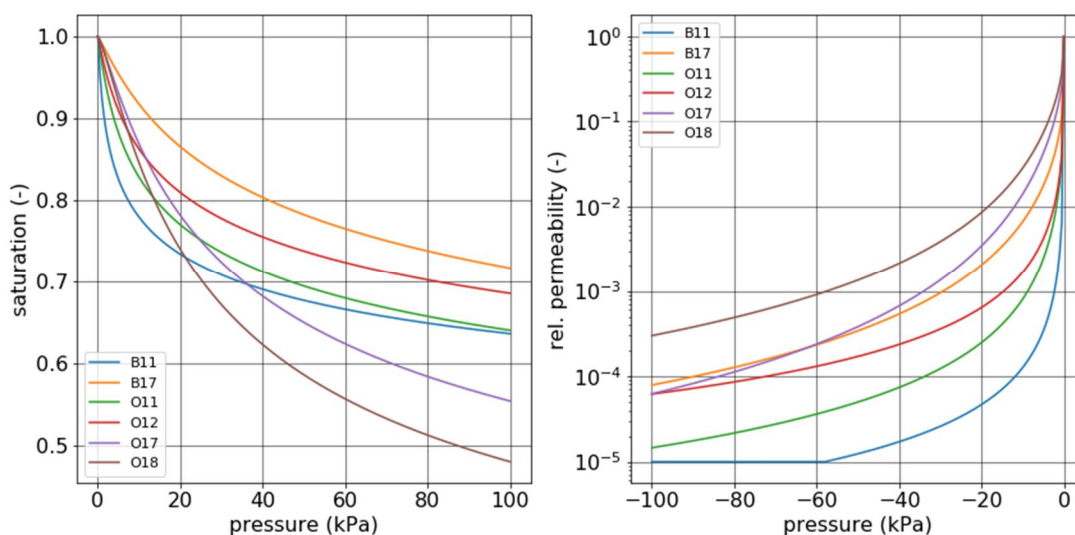
0.00	Bouwsteen	Omschrijving
0.08	B11	matig zware klei
0.20	B11	matig zware klei
0.50	O12	matig zware klei
0.70	O17	mesotroof en eutroof veen
1.20	O17	mesotroof en eutroof veen

Tabel 5.5 Bodemfysische eenheid 415 (WUR)

0.00	Bouwsteen	Omschrijving
0.25	B11	matig zware klei
0.60	O12	matig zware klei
0.90	O11	lichte klei
1.20	O11	lichte klei

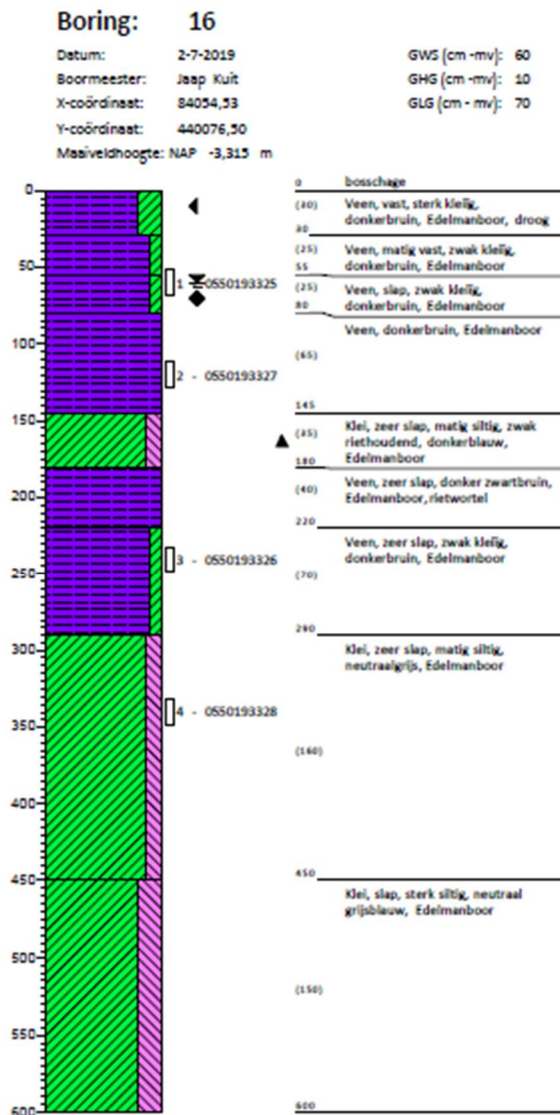
Tabel 5.6 Bodemfysische eenheid 420 (WUR)

Onderkant laag	Bouwsteen	Omschrijving
0.25	B10	lichte klei
0.40	B10	lichte klei
0.70	O12	matig zware klei
1.20	O11	lichte klei



Figuur A 2 Onverzadigd materiaalgedrag (WUR)

B Boringen



Figuur B 1 Boorbeschrijving profiel 16 (bron anteagroup 2020)

Tabel 5.7 Bodemopbouw boring 16 (bron anteagroup 2020)

Diepte (m -MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	1.45	veen	0.35
1.45	1.80	klei	0.96
1.80	2.90	veen	0.35
2.90	10.00	klei	0.96

Boring: 57

Datum: 3-7-2019

Boormeeester: Jaap Kuit

X-coördinaat: 83671,82

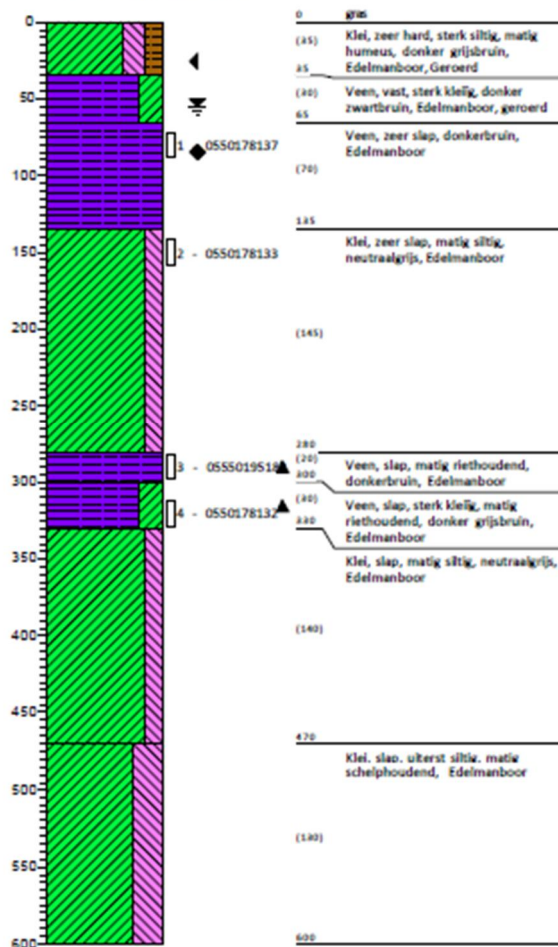
Y-coördinaat: 441499,60

Measiveldhoogte: NAP -3,107 m

GW5 (cm -mv): 55

GHG (cm -mv): 25

GLG (cm -mv): 85



Figuur B 2 Boorbeschrijving profiel 57 (bron anteagroup 2020)

Tabel 5.8 Bodemopbouw boring 57 (bron anteagroup 2020)

Diepte (m -MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	0.35	klei	0.96
0.35	0.65	veen	0.50
0.65	1.35	veen	0.35
1.35	2.80	klei	0.96
2.80	3.00	veen	0.35
3.00	3.30	veen	0.50
3.30	6.90	klei	0.96
6.90	7.15	veen	0.35
7.15	10.00	klei	0.96

Boring: 31

Datum: 2-7-2019

Boormeester: Jaap Kuit

X-coördinaat: 83704,23

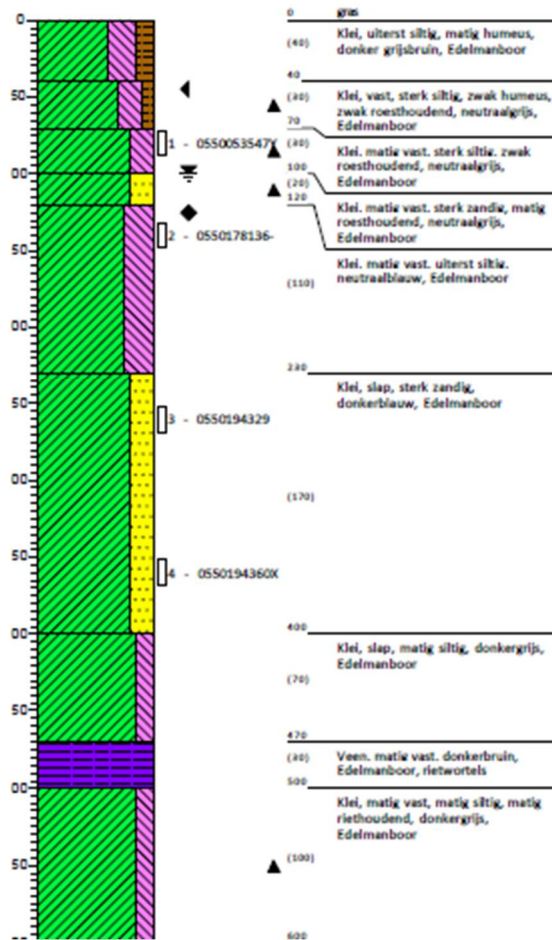
Y-coördinaat: 440787,20

Massieveloogte: NAP -2,941 m

GWS (cm -mv): 100

GHG (cm -mv): 45

GLG (cm -mv): 125



Figuur B 3 Boorbeschrijving profiel 31 (bron anteagroup 2020)

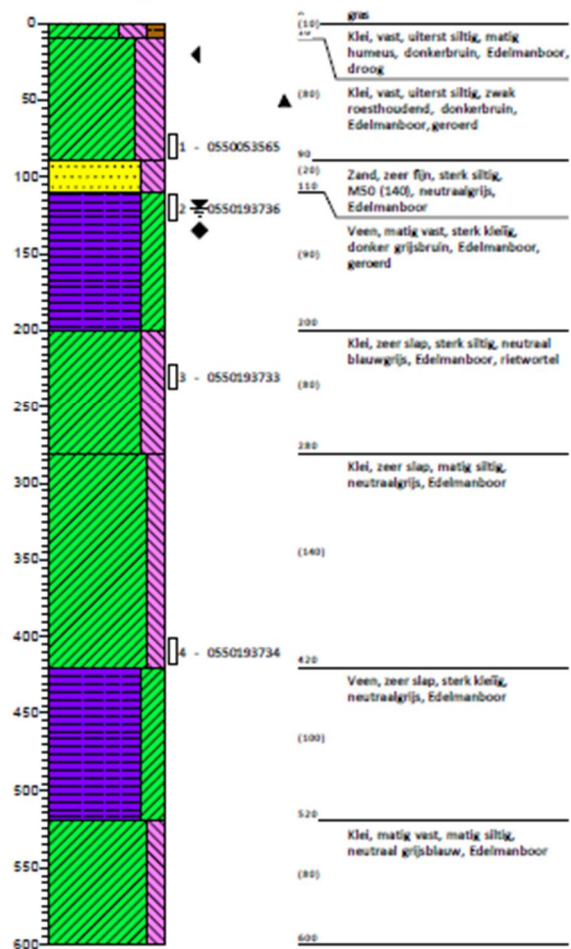
Tabel 5.9 Bodemopbouw boring 31 (bron anteagroup 2020)

Diepte (m -MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	1.00	klei	0.96
1.00	1.20	klei	1.13
1.20	2.30	klei	0.96
2.30	4.00	klei	1.13
4.00	4.70	klei	0.96
4.70	5.00	veen	0.35
5.00	10.00	klei	0.96

Boring: 21

Datum: 2-7-2019
 Boormeester: Jaap Kuit
 X-coördinaat: 83949,31
 Y-coördinaat: 440263,60
 Maaiveldhoogte: NAP -2,754 m

GWS (cm -mv): 120
 GHG (cm -mv): 20
 GLG (cm -mv): 135

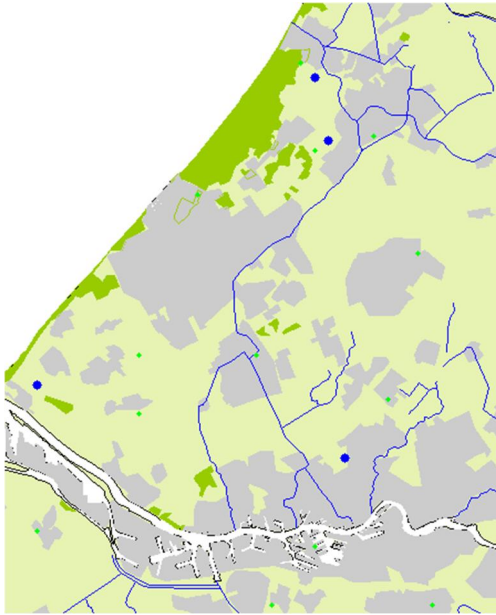


Figuur B 4 Boorbeschrijving profiel 21 (bron anteagroup 2020)

Tabel 5.10 Bodemopbouw boring 21 (bron anteagoup)

Diepte (m-MV)		Grondsoort	Warmtegeleiding (W/mK)
0.00	0.90	klei	0.96
0.90	1.10	zand	1.82
1.10	2.00	veen	0.50
2.00	4.20	klei	0.96
4.20	5.20	veen	0.50
5.20	8.55	klei	0.96
8.55	8.75	veen	0.35
8.75	10.00	klei	0.96

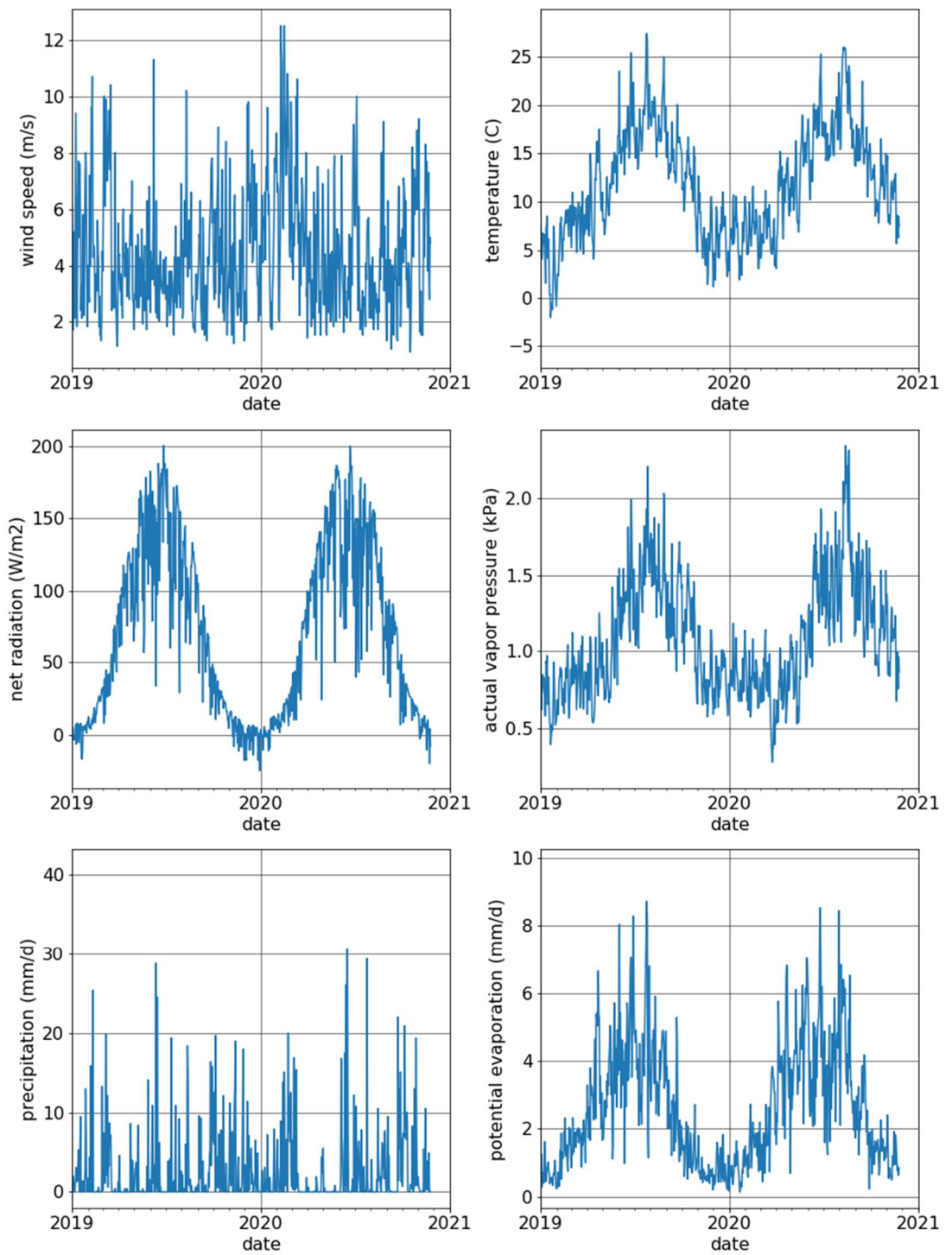
C Meteorologische gegevens



Figuur C 1 Locaties weerstations KNMI

Tabel 5.11 Gegevens locatie, gewas en grond

Parameter	Waarde	Eenheid
latitude	5.20E+01	degN
altitude	4.30E+00	m
leave area index	3.00E+00	-
kappa factor	5.60E-01	-
gewas hoogte	1.20E+01	cm
worteldiepte	3.00E+01	cm
reflectie coëfficiënt gewas	2.30E-01	-
weerstand gewas	7.00E+01	s/m
reflectie coëfficiënt grond	1.50E-01	-
weerstand grond	0.00E+00	s/m



Figuur C 2 Meetgegevens weerstation Rotterdam (KNMI)

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl