Deltares

WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen

Modelberekeningen bodemtemperatuur en vochtgehalte



WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen

Modelberekeningen bodemtemperatuur en vochtgehalte

Auteurs
dr.ir. John van Esch

cover: Leiding trace (bron Google Earth)

WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen

Modelberekeningen bodemtemperatuur en vochtgehalte

Opdrachtgever	Deltares
Contactpersoon	John van Esch
Referenties	11209147-001-GEO-0001
Trefwoorden	warmtetransportleiding, bodemtemperatuur, vochtgehalte

Document controle	
Versie	Mei 2023
Datum	Mei 2023
Projectnummer	11209147-001
Document ID	11209147-001-GEO-0001-v1-warmtelinq vondelingenplaat - vlaardingen
Pagina's	57
Status	concept

Auteur(s)		
	John van Esch	Deltares

Gebruik van deze tabel is voor de controle van juiste uitvoering door Deltares van de opdracht. Ieder ander klantgebruik en externe verspreiding is niet toegestaan.

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
Mei 2023	John van Esch	Henk Kruse	Ahmed Elkadi

Samenvatting

Met de WarmtelinQ transportleidingen wordt restwarmte uit de Rotterdamse haven naar delen van de provincie Zuid Holland getransporteerd. Met de warmte kunnen huizen en bedrijven worden verwarmd. In dit onderzoek is de toename van de temperatuur in de ondergrond en afname van het bodemvochtgehalte als gevolg van de aanleg van WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen met modelberekeningen vastgesteld. Deze veranderingen in bodemcondities worden in een vervolgonderzoek vertaald naar de mogelijke schade aan gewassen, bomen en struiken die zich in de directe omgeving van de leiding bevinden.

In totaal zijn vier locaties langs het leidingtracé onderzocht met een wisselende bodemopbouw en variërende geo-hydrologische condities. Op de eerste locatie liggen de leidingen onder en sloot, op de tweede locatie bestaat de bodembedekking uit gras en op de derde en vierde locatie bevinden zich bomen en struiken in de directe omgeving van de leiding. De uitkomsten van de berekeningen zijn grafisch weergegeven in een verticale snede rond de leidingen voor een representatieve winter en een zomersituatie. Voor de beoordeling van schade aan de omgeving zijn tabellen met maandgemiddelde waarden van de bodemtemperatuur en het vochtgehalte gepresenteerd.

Het vochtgehalte in de bovenste grondlagen volgt uit het product van de verzadigingsgraad en de porositeit. In het eerste blijft de ondergrond volledig verzadigd. In de overige profielen neemt het vochtgehalte in de bovenste laag met maximaal 47% tot 53% af in de zomer. In alle gevallen is de afname van het vochtgehalte het gevolg van het verschil in atmosferische condities in de winter en de zomer. Het effect van de warmteleiding op het vochtgehalte is verwaarloosbaar.

De toename van de bodemtemperatuur door de warmteleidingen is het grootst in het eerste profiel en bedraagt 11°C op een diepte van 50 cm beneden de slootbodem, direct naast de aanvoerleiding. De uitwisseling van warmte tussen boven- en ondergrond vindt hier plaats aan het wateroppervlak, 1 m boven de slootbodem. Bij de berekening is aangenomen dat het water in de sloot niet stroomt.

In de overige profielen vindt de uitwisseling plaats aan het maaiveld. Direct naast de leiding op een afstand van 50 cm is de maximale temperatuursverhoging 8°C en op een diepte van 1 m, 4°C en op een diepte van 50 cm en 1°C op een diepte van 10 cm. Vijf meter naast de leiding blijft de temperatuurtoename op dezelfde dieptes beperkt tot maximaal 1°C.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	4
	Lijst van tabellen	6
	Lijst van figuren	7
1	Inleiding	9
2	Opzet onderzoek	12
3	Beschikbare gegevens	13
4	Model berekeningen	25
5	Conclusies	33
6	Aanbevelingen	34
A	Grondwaterstanden	36
B	Bodembeschrijvingen	37
C	Atmosferische condities	39
D	Stijghoogteverloop ondergrond	40
E	temperatuurverloop ondergrond	44
F	Beoordelingstabellen	48

Lijst van tabellen

3.1	Materiaalgegevens bovengrond.	14
3.2	Materiaalgegevens ondergrond.	15
3.3	Materiaalgegevens water en leiding.	15
3.4	Gegevens micro-klimaat model.	16
3.5	Ligging rekenpunten.	16
3.6	Ondergrondschematisatie profiel 1.	18
3.7	Pijpleidingen profiel 1.	18
3.8	Ondergrondschematisatie profiel 2.	20
3.9	Pijpleidingen profiel 2.	20
3.10	Ondergrondschematisatie profiel 3.	22
3.11	Pijpleidingen profiel 3.	22
3.12	Ondergrondschematisatie profiel 4.	24
3.13	Pijpleidingen profiel 4.	24
4.1	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1 met leidingen.	26
4.2	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1 zonder leidingen.	26
4.3	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.	27
4.4	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2 zonder leidingen.	27
4.5	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.	28
4.6	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 2 zonder leidingen.	28
4.7	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.	29
4.8	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3 zonder leidingen.	29
4.9	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.	30
4.10	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3 zonder leidingen.	30
4.11	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.	31
4.12	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4 zonder leidingen.	31
4.13	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.	32
4.14	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4 zonder leidingen.	32
F.1	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 1 met leidingen.	49
F.2	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1 met leidingen.	50
F.3	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.	51
F.4	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.	52
F.5	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.	53
F.6	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.	54
F.7	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.	55
F.8	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.	56

Lijst van figuren

1.1	Trace WarmtelinQ.	9
1.2	Tracé WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen.	10
2.1	Standaard sleufprofiel DN700/900 VPS	12
3.1	Onverzadigd materiaal gedrag.	14
3.2	Ligging profiel 1 (bron Google Earth).	17
3.3	Kaartvlak 23, ligging profiel 1.	17
3.4	Dwarsdoorsnede profiel 1.	18
3.5	Ligging profiel 2 (bron Google Earth).	19
3.6	Kaartvlak 18, ligging profiel 2.	19
3.7	Dwarsdoorsnede profiel 2.	20
3.8	Ligging profiel 3 (bron Google Earth).	21
3.9	Kaartvlak 13, ligging profiel 3.	21
3.10	Dwarsdoorsnede profiel 3.	22
3.11	Ligging profiel 4 (bron Google Earth).	23
3.12	Kaartvlak 12, ligging profiel 4.	23
3.13	Dwarsdoorsnede profiel 4.	24
4.1	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1.	26
4.2	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2.	27
4.3	temperatuurverloop rekenpunten profiel 2.	28
4.4	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3.	29
4.5	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3.	30
4.6	Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4.	31
4.7	Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4.	32
A.1	Grondwaterstanden eerste watervoerend pakket.	36
B.1	Boorbeschrijving B1084, profiel 1.	37
B.2	Boorbeschrijving B1088, profiel 2.	37
B.3	Boorbeschrijving B1094, profiel 3.	38
B.4	Boorbeschrijving B1095, profiel 4.	38
C.1	KNMI metingen weerstation Voorschoten.	39
D.1	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 1, 1 februari 2020.	40
D.2	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 1, 1 augustus 2020.	40
D.3	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 2, 1 februari 2020.	41
D.4	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 2, 1 augustus 2020.	41
D.5	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 2, 1 februari 2020.	42
D.6	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 3, 1 augustus 2020.	42
D.7	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 4, 1 februari 2020.	43
D.8	Stijghoogteverloop ondergrond profiel 4, 1 augustus 2020.	43
E.1	Temperatuurverloop ondergrond profiel 1, 1 februari 2020.	44
E.2	Temperatuurverloop ondergrond profiel 1, 1 augustus 2020.	44
E.3	Temperatuurverloop ondergrond profiel 2, 1 februari 2020.	45
E.4	Temperatuurverloop ondergrond profiel 2, 1 augustus 2020.	45
E.5	Temperatuurverloop ondergrond profiel 3, 1 februari 2020.	46
E.6	Temperatuurverloop ondergrond profiel 3, 1 augustus 2020.	46
E.7	Temperatuurverloop ondergrond profiel 4, 1 februari 2020.	47

E.8 Temperatuurverloop ondergrond profiel 4, 1 augustus 2020. 47

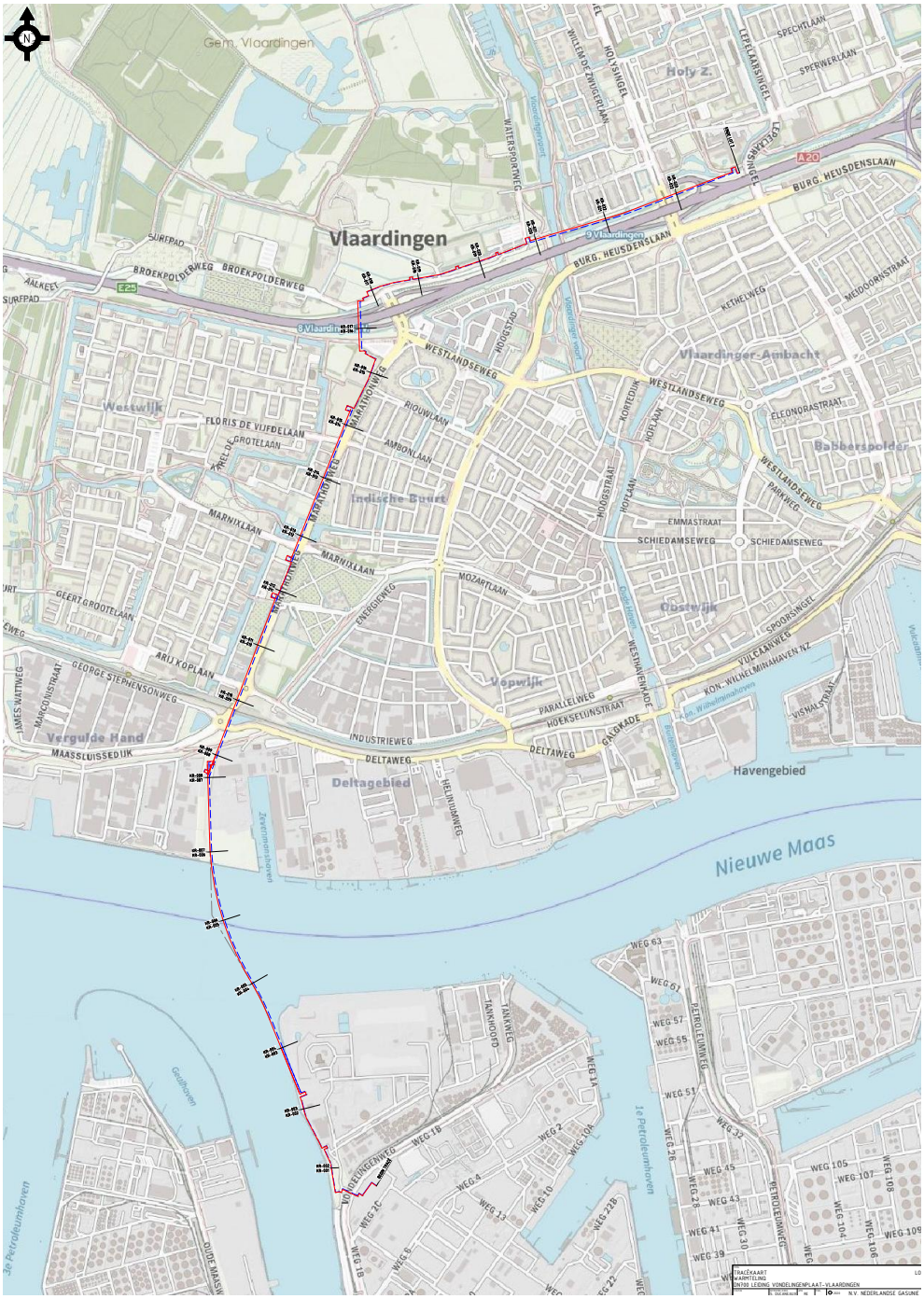
1 Inleiding

WarmtelinQ bestaat uit twee ondergrondse warmtetransportleidingen waarmee restwarmte vanuit de Rotterdamse haven wordt getransporteerd. Met de aanvoerleiding wordt de warmte naar huizen en bedrijven in een deel van Zuid-Holland getransporteerd die daarmee duurzaam kunnen worden verwarmd. De daarnaast gelegen retourleiding voert het afgekoelde water terug naar Rotterdam waar het weer opgewarmd wordt en terug geleverd wordt aan de aanvoerleiding. Figuur 1.1 geeft een indruk van het leidingtracé.



Figuur 1.1 Trace WarmtelinQ.

Het deelproject WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen voorziet in de aanleg van een ondergrondse aanvoerleiding en een retourleiding van 6,5 kilometer. Het leidingtracé WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen is afgebeeld in figuur 1.2. Het tracé start op de Vondelingenplaat, ten zuidoosten van de Vondelingenweg in de gemeente Rotterdam, loopt vervolgens in noordelijke richting onder de Nieuwe Waterweg door, volgt de Marathonweg in de gemeente Vlaardingen en sluit ten noorden van Rijksweg A20 aan op de leiding Vlaardingen – Den Haag ter hoogte van de Lepelaarsingel.



Figuur 1.2 Tracé WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen.

De leidingen hebben een binnendiameter van 700 mm en een buitendiameter van 900 mm en worden aangesloten op WarmtelinQ Vlaardingen – Den Haag en WarmtelinQ Rijswijk – Leiden. Het project wordt uitgevoerd door WarmtelinQ B.V. dat onderdeel is van de Gasunie.

Als gevolg van het warmtetransport door de aanvoer- en retourleiding zal de ondergrond rond de warmtetransportleidingen opwarmen. Het voorliggende onderzoek moet uitwijzen of de temperatuursverhoging tot mogelijke schade aan bomen en struiken leidt. Het onderzoek bestaat uit twee delen. Het eerste deel betreft

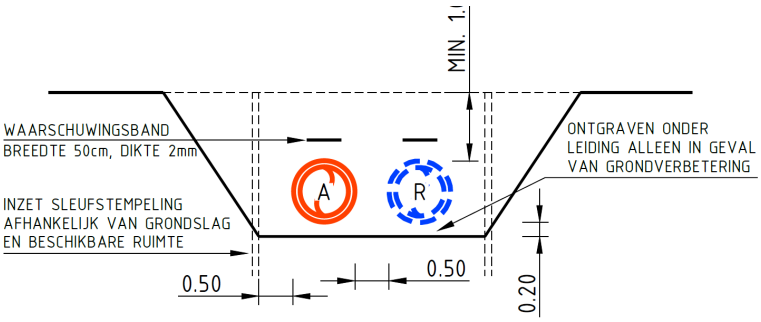
het vaststellen van de te verwachten temperatuurtoename in de bodem en de veranderingen in het bodemvochtgehalte. Het tweede deel van het onderzoek richt zich op het bepalen van de effecten hiervan op bomen en struiken. Het eerste deel is uitgevoerd door Deltares en het tweede deel wordt uitgevoerd door de RHDHV. Deze rapportage beschrijft de resultaten van het eerste onderdeel.

In hoofdstuk 2 wordt de opzet van het onderzoek beschreven. De beschikbare gegevens voor het onderzoek zijn samengebracht in hoofdstuk 3. Dit betreft een set van geo-hydrologische en geo-thermische materiaalparameters waarmee het fysisch gedrag van de ondergrond wordt beschreven, eigenschappen van de leidingen en eigenschappen van de bodembedekking. De temperatuurtoename in de bodem en de veranderingen van het bodemvochtgehalte zijn op basis van deze gegevens berekend. De resultaten van de berekeningen zijn samengevat in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 bevat conclusies en hoofdstuk 6 geeft aanbevelingen voor vervolg onderzoek.

2 Opzet onderzoek

De onderzoeksvraag die wordt gesteld is: 'hoe groot is de toename van de temperatuur in de ondergrond en hoe groot is de mogelijke afname van het bodemvochtgehalte als gevolg van de aanleg van de warmteleidingen'.

Deze vraag wordt beantwoord met behulp van tweedimensionale modelberekeningen waarmee de situatie met en zonder warmteleidingen op vier locaties wordt gesimuleerd. Op deze locaties liggen de leidingen in een standaard sleufprofiel dat is afgebeeld in figuur 2.1. De DN700/900 leidingen zijn samengeteld uit een stalen binnenbuis en een PE buitenmantel. Tussen de binnenbuis en de buitenmantel is een isolatielaag van PUR aangebracht.



Figuur 2.1 Standaard sleufprofiel DN700/900 VPS

.

De ondergrondprofielen worden afgeleid uit boringen en sonderingen die langs het leidingtracé zijn uitgevoerd. Voor de beschrijving van de bovenste grondlagen wordt de kaart met bodemfysische eigenschappen gebruikt, die door de WUR is opgesteld (Wesseling en Heidema (2023)). De bodemfysische eigenschappen zelf zijn vastgelegd in de Staring reeks (Wösten *et al.* (2001)). De thermische eigenschappen van de ondergrond en het niveau van het grondwater worden bepaald met het landelijk geohydrologisch model (TNO (2020b)).

Met grondwaterstromings- en bodemtemperatuurberekeningen wordt de bodemtemperatuur en de verandering in het vochtgehalte voorspeld. De berekeningen worden gemaakt met het eindige elementen model DgFlow dat door Deltares is ontwikkeld (Van Esch en Kruse (2020),Van Esch *et al.* (2021)). Bij de berekeningen wordt de temperatuur in de warmteleidingen constant verondersteld en worden tijdsafhankelijke meteorologische condities aan maaiveld opgelegd. Deze condities volgen uit KNMI metingen van het weerstation Rotterdam (knm). Met het model worden de jaren 2019 en 2020 doorgerekend. Het jaar 2020 wordt gekenmerkt als een warm en droog. Het jaar 2019 wordt gebruikt als zogenaamde inspeelperiode om een dynamisch evenwicht aan het begin van het jaar 2020 te bepalen.

Voor het bepalen van de effecten van de leidingen op bomen en struiken in het tracé worden de situaties met warmteleidingen en zonder leidingen doorgerekend. De berekende bodemtemperaturen en bodemvochtgehaltes (daggemiddelde waarden, en maandgemiddelde waarden) op 0,1 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m en 2,0 m beneden maaiveld op een afstand van 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m, 5,0 m en 10,0 m vanaf de leidingwand, worden gebruikt bij het vaststellen van de effecten.

3 Beschikbare gegevens

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de gegevens waarmee de berekeningen worden uitgevoerd. Eerst worden geo-hydrologische en geo-thermische parameters gepresenteerd waarmee de ondergrond op de onderzoekslocaties wordt beschreven. Vervolgens wordt een beschrijving gegeven van de leidingen met de thermische parameters die nodig zijn voor het beschrijven van de warmte uitwisseling met de ondergrond. Voor de uitwisseling van warmte tussen de ondergrond en de atmosfeer worden de meteorologische condities toegelicht en wordt een overzicht gegeven van de condities die aan het maaiveld worden opgelegd. De rekenresultaten worden verzameld in een aantal rekenpunten naast de aanvoerleiding, de ligging van de rekenpunten wordt toegelicht. Tenslotte worden locatiespecifieke gegevens gepresenteerd voor de vier onderzoekslocaties.

Ondergrond

Met het rekenmodel DgFlow worden gekoppelde grondwaterstromings- en warmtetransportberekeningen uitgevoerd. Daarbij wordt de stroming van grondwater door de verzadigde ondergrond onder de grondwaterspiegel en door de onverzadigde zone boven de grondwaterspiegel beschreven. Voor deze berekeningen moeten de fysische eigenschappen van de grondsoorten waaruit de ondergrond is opgebouwd worden bepaald. Voor een stromingsberekening zijn dat de porositeit n, de verzadigde doorlatendheid K en de samendrukbaarheid van het korrelskelet α. In de onverzadigde zone zijn de poriën gedeeltelijk gevuld met water waardoor de doorlatendheid afneemt. De verzadigingsgraad en de relatieve doorlatendheid worden berekend met het Van Genuchten model waarvoor de minimale verzadigingsgraad S_r, de maximale verzadigingsgraad S_s en een drietal materiaalparameters g_α, g_n en g_l per grondsoort moeten worden opgegeven.

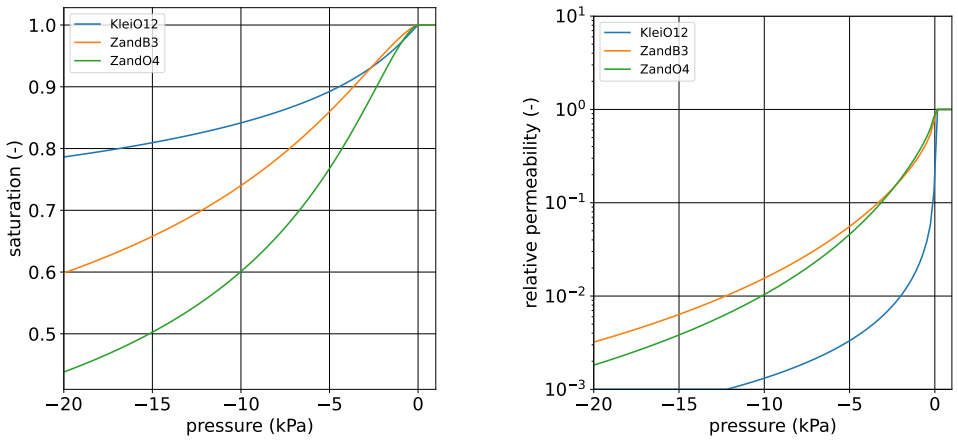
De warmteberekening maakt gebruik van de dichtheid ρ^s en de warmtecapaciteit c^s van de korrels en de dichtheid ρ^w en warmtecapaciteit c^w van het water in de poriën. Voor de bepaling van de dichtheid en warmtecapaciteit van de grond worden deze waarden gewogen met de porositeit en de mate van verzadiging. De mate van verzadiging volgt uit de stromingsberekening. De thermische geleidbaarheid van de korrels wordt beschreven met twee parameters λ^a en λ^b de geleidbaarheid van water met λ^w. Met deze kentallen kan de geleidbaarheid van de grond bij verschillende waarden van de verzadigingsgraad door het model worden berekend.

Tabel 3.1 bevat de geohydrologische en geothermische eigenschappen van bovengronden die gedeeltelijk verzadigd kunnen zijn. Voor deze gronden wordt de relatie tussen verzadigingsgraad, relatieve doorlatendheid en waterdruk afgebeeld in figuur 3.1. In de tabel worden de dichtheden van droge grond ρ^{dry} en van verzadigde grond ρ^{wet} gepresenteerd evenals de warmtecapaciteit en thermische geleidbaarheid van droge grond c^{dry}, λ^{dry} en volledig verzadigde grond c^{wet}, λ^{wet}. In tabel 3.2 zijn de materiaalgegevens voor de dieper gelegen lagen samengevat die onder veldcondities verzadigd zijn.

De bodemprofielen zijn afgeleid uit de Bodemkaart (Wesseling en Heidema (2023), bijlage A) en boringen langs het leidingtracé (bijlage B).

Tabel 3.1 Materiaalgegevens bovengrond.

parameter	KleiO12	ZandB3	ZandO4
$n\ (-)$	0,49	0,35	0,35
$K\ (\mathrm{m/d})$	0,1080	0,1800	0,5300
$\alpha\ (1/\mathrm{MPa})$	0,0000	0,0000	0,0000
$S_r\ (-)$	0,00	0,00	0,00
$S_s\ (-)$	1,00	1,00	1,00
$g_\alpha\ (1/\mathrm{m})$	3,840	1,520	2,160
$g_n\ (-)$	1,113	1,412	1,540
$g_l\ (-)$	-6,74	-0,21	-0,52
$\rho^s\ (\mathrm{kg/m^3})$	2370	2650	2650
$c^s\ (\mathrm{J/kgK})$	2000	700	700
$\lambda^a\ (\mathrm{W/mK})$	1,99	0,15	0,15
$\lambda^b\ (\mathrm{W/mK})$	0,00	3,06	3,06
$\alpha_l\ (\mathrm{m})$	0,00	0,00	0,00
$\alpha_t\ (\mathrm{m})$	0,00	0,00	0,00
$\rho^{dry}\ (\mathrm{kg/m^3})$	1209	1722	1722
$\rho^{wet}\ (\mathrm{kg/m^3})$	1699	2072	2072
$c^{dry}\ (\mathrm{J/kgK})$	1020	455	455
$c^{wet}\ (\mathrm{J/kgK})$	3069	1919	1919
$\lambda^{dry}\ (\mathrm{W/mK})$	1,01	0,10	0,10
$\lambda^{wet}\ (\mathrm{W/mK})$	1,31	2,30	2,30



Figuur 3.1 Onverzadigd materiaal gedrag.

Tabel 3.2 Materiaalgegevens ondergrond.

parameter	Zand	Klei	Veen
$n\ (-)$	0,35	0,56	0,80
$K\ (\mathrm{m/d})$	1,0000	0,0100	0,0200
$\alpha\ (1/\mathrm{MPa})$	0,0000	0,0000	0,0000
$\rho^s\ (\mathrm{kg/m^3})$	2650	2350	1500
$c^s\ (\mathrm{J/kgK})$	700	500	1200
$\lambda^a\ (\mathrm{W/mK})$	0,15	0,18	0,35
$\lambda^b\ (\mathrm{W/mK})$	3,06	3,30	0,00
$\alpha_l\ (\mathrm{m})$	0,00	0,00	0,00
$\alpha_t\ (\mathrm{m})$	0,00	0,00	0,00
$\rho^{wet}\ (\mathrm{kg/m^3})$	2072	1594	1100
$c^{wet}\ (\mathrm{J/kgK})$	1919	2562	3586
$\lambda^{wet}\ (\mathrm{W/mK})$	2,30	1,87	0,55

Warmteleidingen

De thermische eigenschappen van de leidingen zijn samengevat in tabel 3.3. De DN700/900 leidingen, die in het tracé Vondelingenplaat - Vlaardingen worden toegepast, hebben een binnendiameter van 695,2 mm en een buitendiameter van 711,2 mm. De leidingen zijn samengeteld uit een stalen binnenbuis met een PE-coating aan de buitenzijde en een PE buitenmantel. De stalen binnenbuis heeft een binnendiameter van 695,2 mm en een dikte van 8 mm. De PE-mantelbuis heeft een buitendiameter van 711,2 mm en een wanddikte van 11 mm. Tussen de binnenbuis en de buitenmantel is een isolatielaag van PUR aangebracht met dikte van 83,4 mm. In de tabel worden waarden voor de dichtheid ρ, de specifieke warmtecapaciteit c en de thermische geleidbaarheid λ van de materialen waaruit de leidingen zijn samengesteld, gegeven.

Tabel 3.3 Materiaalgegevens water en leiding.

parameter	Pur	Staal	PE	Water
$\rho\ (\mathrm{kg/m^3})$	90	8050	950	1000
$c\ (\mathrm{J/kgK})$	1470	500	1880	4182
$\lambda\ (\mathrm{W/mK})$	0,02	45,00	0,47	0,60

Meteorologische condities

Bijlage C bevat de KNMI metingen in Rotterdam die gebruikt worden als randvoorwaarden voor de berekeningen. In figuur C.1 is achtereenvolgens de atmosferische temperatuur, de korte golf straling door instraling van de zon, de windsnelheid, de relatieve luchtvochtigheid en de gemeten neerslag voor de jaren 2019 en 2020 afgebeeld. Met deze gegevens wordt de verdamping berekend en de netto instroming in de bodem bepaald. De parameters van het micro-klimaat model, dat in dit onderzoek wordt toegepast, zijn samengevat in tabel 3.4. De locatie van het KNMI weerstation Rotterdam wordt geven met de latitude x_{lat} en de altitude z_{alt}. De begroeiing wordt beschreven met de gewashoogte h_c en de weerstand r_s die het gewas geeft op de wind. De reflectiecoëfficiënt α bepaalt de mate absorptie van de

korte golf straling op het oppervlak.

Tabel 3.4 Gegevens micro-klimaat model.

parameter	gras	tegels
x_{lat} (degN+)	51,962	51,962
z_{alt} (m)	-4,30	-4,30
h_c (cm)	12,0	50,0
r_s (s/m)	70,0	30,0
α (−)	0,23	0,12

Rekenpunten

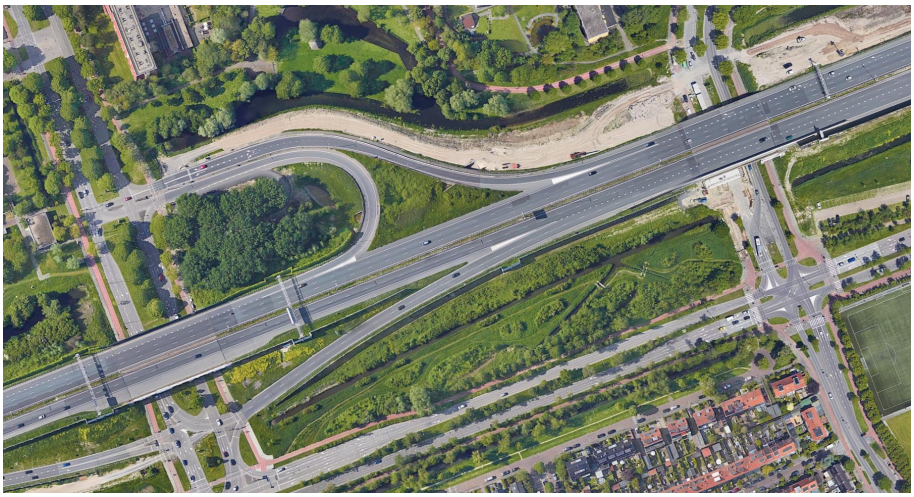
Met de eindige elementen berekeningen wordt het vochtgehalte in de ondergrond en de bodemtemperatuur in een verticale doorsnede bepaald. De resultaten worden in dit rapport gepresenteerd voor de eerste dag van de maanden februari en augustus. Daarnaast wordt het verloop in de tijd voor een aantal punten in de ondergrond grafisch weergegeven. De posities van deze rekenpunten zijn samengevat in tabel 3.5, waarin l de afstand van de buitenwand van de aanvoerleiding tot het rekenpunt weergeeft en d de diepte van het rekenpunt ten opzichte van maaiveld is.

Tabel 3.5 Ligging rekenpunten.

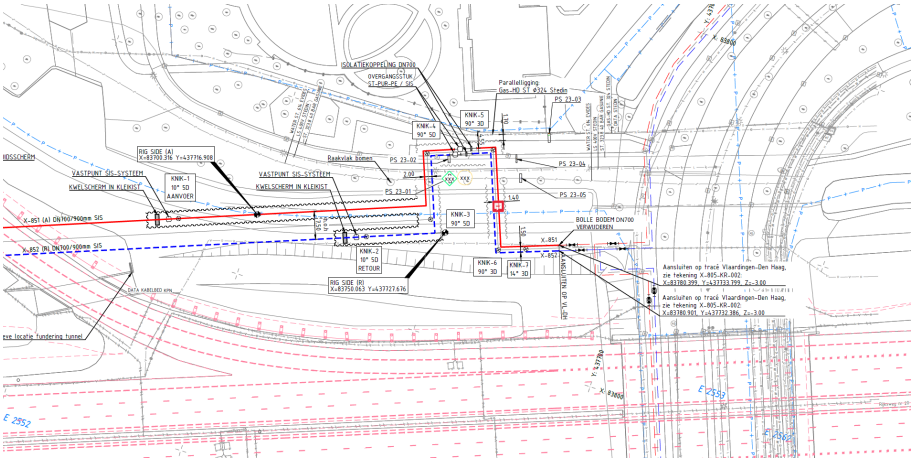
$l/d(m)$	0,50	1,00	2,00	5,00	10,00
-0,10	p1	p6	p11	p16	p21
-0,50	p2	p7	p12	p17	p22
-1,00	p3	p8	p13	p18	p23
-1,50	p4	p9	p14	p19	p24
-2,00	p5	p10	p15	p20	p25

Onderzoekslocatie 1

Onderzoekslocatie 1 ligt in kaartvlak 23 van het leidingtracé, ten noorden van de rijkswegweg A20. In figuur 3.3 en figuur 3.2 is de ligging van het profiel haaks op de leidingen weergegeven. Boven de leidingen ligt een sloot.



Figuur 3.2 Ligging profiel 1 (bron Google Earth).



Figuur 3.3 Kaartvlak 23, ligging profiel 1.

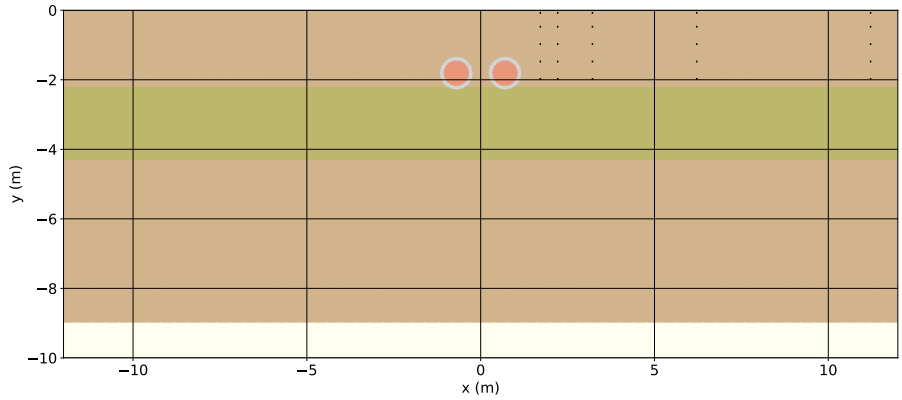
Het bodemprofiel is afgeleid uit boring B361088 (TNO (2020a), bijlage B). De ondergrond in dit profiel bestaat uit veen- en kleilagen. Het profiel is samengevat in tabel 3.6 waarin y_b de bovenkant van de laag en y_o de onderkant van de laag ten opzichte van maaiveld aangeeft. Het maaiveld ligt volgens de ontwerptekening op NAP -3,5 m en het slootpeil is NAP -2,5 m.

De grondwaterstand in het eerste watervoerend pakket volgt uit het landelijk hydrologisch model (TNO (2022), bijlage A). De grondwaterstand deze dieper gelegen zandlaag ligt 0,70 m boven de slootbodem en is dus 0,30 m lager dan het slootpeil. Hierdoor ontstaat een neerwaarts gerichte stroming.

Tabel 3.6 Ondergrondschematisatie profiel 1.

grond	y_b (m)	y_o (m)
Water	1,00	0,00
Klei	0,00	-2,22
Veen	-2,22	-4,32
Klei	-4,32	-9,00
Zand	-9,00	-10,00

De verticale doorsnede waarvoor de berekeningen zijn uitgevoerd is afgebeeld in figuur 3.4. In deze figuur zijn de leidingen opgenomen en zijn de rekenpunten afgebeeld die zich een afstand van 0,5 m, 1 m, 2 m, 5 m en 10 m naast de aanvoerleiding bevinden (tabel 3.5).



Figuur 3.4 Dwarsdoorsnede profiel 1.

De bovenkant van de leiding ligt op NAP -4,86 m. Leidinggegevens zijn opgenomen in tabel 3.7. Hierin is het middelpunt van de leiding gegeven door x en y, de binnenstraal met r_i en de buitenstraal met r_o. T is de temperatuur van het water in de leiding. Uit de tabel volgt een tussenafstand van 50 cm en een gronddekking van 1,36 m.

Tabel 3.7 Pijpleidingen profiel 1.

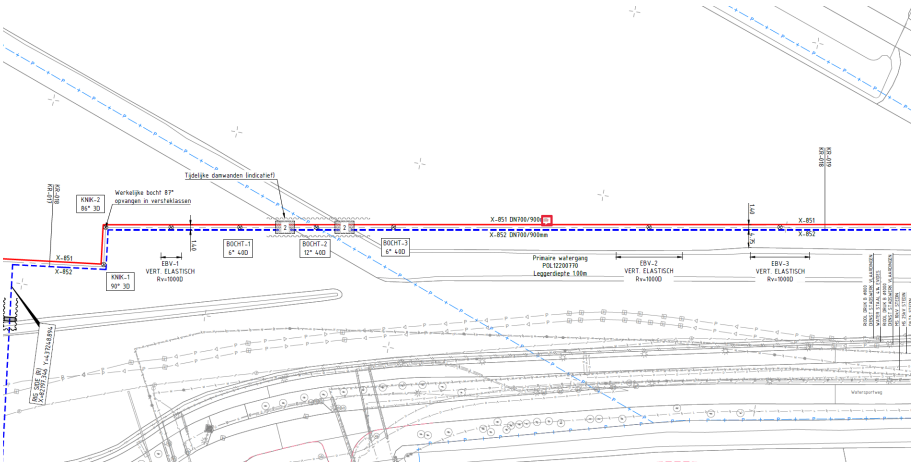
leiding	x (m)	y (m)	r_i (mm)	r_o (mm)	T (°C)
heat return	-0,700	-1,810	346	450	70,0
heat supply	0,700	-1,810	346	450	120,0

Onderzoekslocatie 2

In de figuren 3.6 en 3.5 is de ligging van het tweede onderzoekslocatie weergegeven. Het profiel ligt aan de noordzijde van de A20 en de bodembedekking is gras.



Figuur 3.5 Ligging profiel 2 (bron Google Earth).



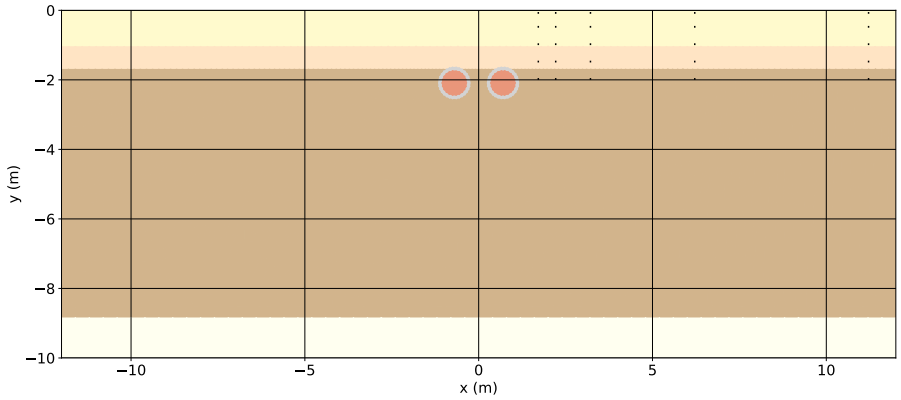
Figuur 3.6 Kaartvlak 18, ligging profiel 2.

Het bodemprofiel is afgeleid uit boring B361084 (TNO (2020a), bijlage B); het profiel is opgebouwd uit zand en kleilagen. De ondergrondschematisatie is gegeven in tabel 3.8. Volgens de ontwerptekening ligt het maaiveld op NAP -1,60 m. De grondwaterstand in het eerste watervoerend pakket is afgeleid uit het landelijk hydrologisch model (TNO (2022), bijlage A). Deze grondwaterstand van mv -0,20 m wordt toegekend aan de onderrand van het model.

Tabel 3.8 Ondergrondschematisatie profiel 2.

grond	y_b (m)	y_o (m)
ZandB3	0,00	-1,05
KleiO12	-1,05	-1,70
Klei	-1,70	-8,85
Zand	-8,85	-10,00

De ondergrondbeschrijving volgens het rekenmodel is afgebeeld in figuur 3.7. De leidinggegevens zijn opgenomen in tabel 3.9. Uit die tabel volgt een tussenafstand van 50 cm en een gronddekking van 1,64 m.



Figuur 3.7 Dwarsdoorsnede profiel 2.

Tabel 3.9 Pijpleidingen profiel 2.

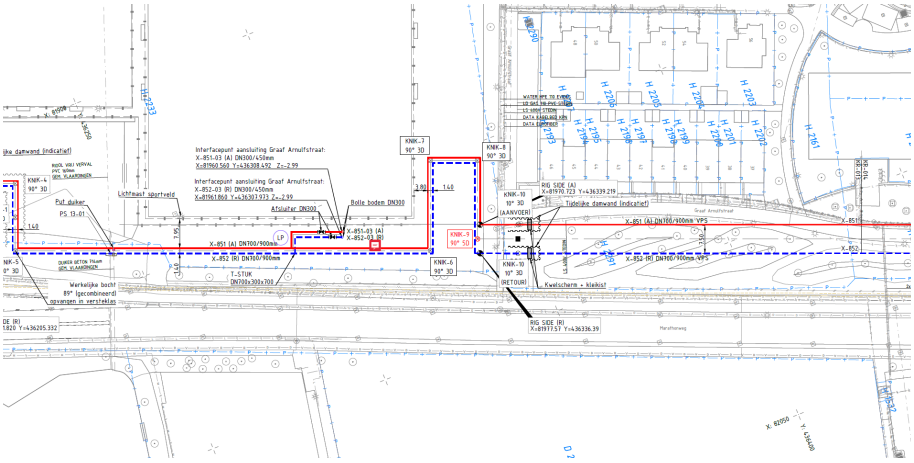
leiding	x (m)	y (m)	r_i (mm)	r_o (mm)	T (°C)
heat return	-0,700	-2,090	348	450	70,0
heat supply	0,700	-2,090	348	450	120,0

Onderzoekslocatie 3

Het derde onderzoekslocatie ligt in kaartvlak 13 (figuur 3.9) langs de Marathonweg (figuur 3.8). In de nabijheid van de onderzoekslocatie zijn bomen en stuiken aanwezig.



Figuur 3.8 Ligging profiel 3 (bron Google Earth).



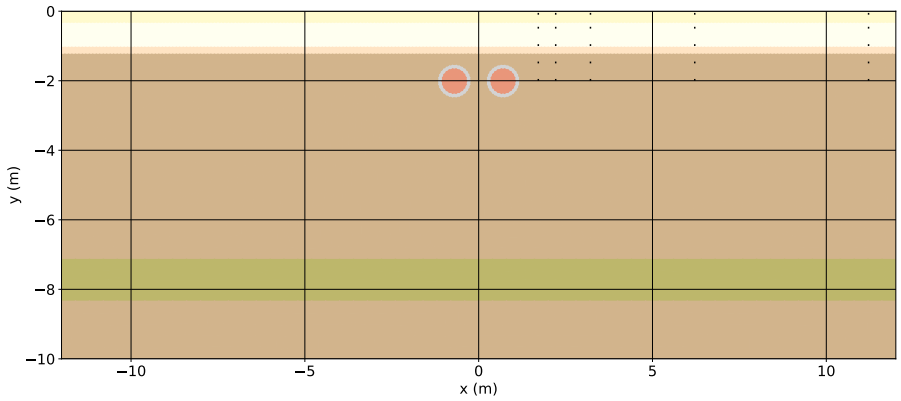
Figuur 3.9 Kaartvlak 13, ligging profiel 3.

Het bodemprofiel is afgeleid uit boring B361095 (TNO (2020a), bijlage B). Het profiel is opgebouwd uit zand, klei en veenlagen. Het maaiveld ligt volgens de ontweptekening op NAP -1,40 m. De grondwaterstand volgens het landelijk hydrologisch model (TNO (2022), bijlage A) ligt 0,80 m beneden maaiveld.

Tabel 3.10 Ondergrondschematisatie profiel 3.

grond	y_b (m)	y_o (m)
ZandB3	0,00	-0,35
ZandO4	-0,35	-1,04
KleiO12	-1,04	-1,24
Klei	-1,24	-7,14
Veen	-7,14	-8,34
Klei	-8,34	-10,00

De schematische weergave van de ondergrond is afgebeeld in figuur 3.10 en leiding gegevens zijn verzameld in tabel 3.11. De bovenkant van de leiding ligt op NAP -3,05 m. Volgens de tabel is de afstand tussen de leidingen 50 cm en de gronddekking 1,65 m.



Figuur 3.10 Dwarsdoorsnede profiel 3.

Tabel 3.11 Pijpleidingen profiel 3.

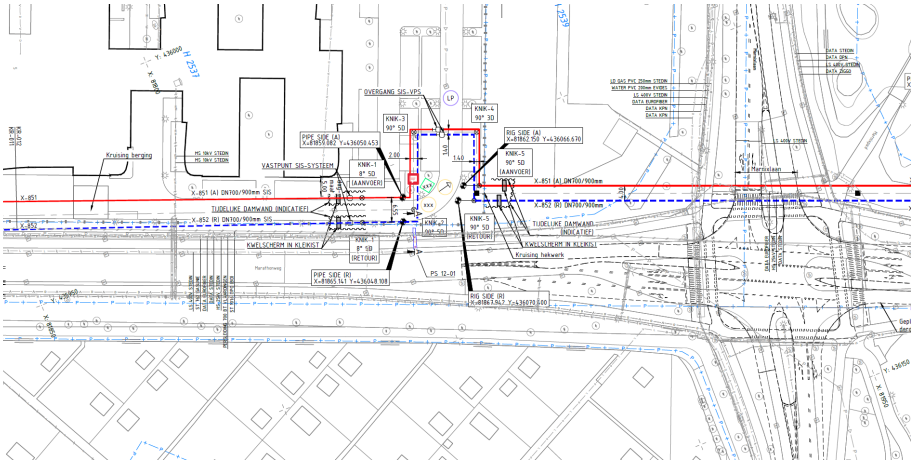
leiding	x (m)	y (m)	r_i (mm)	r_o (mm)	T (°C)
heat return	-0,700	-2,010	348	450	70,0
heat supply	0,700	-2,010	348	450	120,0

Onderzoekslocatie 4

Het vierde onderzoekslocatie ligt in kaartvlak 12 (figuur 3.12) eveneens langs de Marathonweg (figuur 3.11). Het profiel ligt in een stedelijke omgeving met bomen en struiken.



Figuur 3.11 Ligging profiel 4 (bron Google Earth).



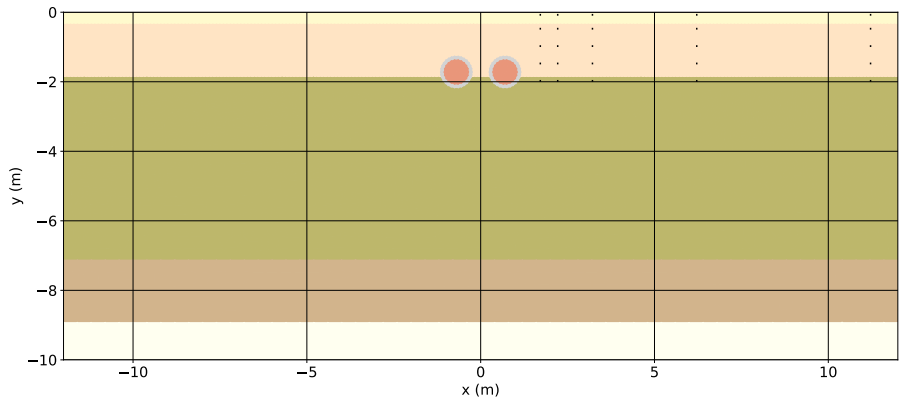
Figuur 3.12 Kaartvlak 12, ligging profiel 4.

Het bodemprofiel is afgeleid uit boring B361094 (TNO (2020a), bijlage B). Volgens het bodemprofiel bestaat de ondergrond uit zand-, klei- en veenlagen. Het maaiveld ligt op NAP -1,55 m. De grondwaterstand in de onderste zandlaag is mv -0,65 m. Deze waarde volgt uit het landelijk hydrologisch model (TNO (2022), bijlage A).

Tabel 3.12 Ondergrondschematisatie profiel 4.

grond	y_b (m)	y_o (m)
ZandB3	0,00	-0,35
KleiO12	-0,35	-1,88
Veen	-1,88	-7,13
Klei	-7,13	-8,93
Zand	-8,93	-10,00

De verticale snede waarvoor de berekeningen worden uitgevoerd is afgebeeld in figuur 3.13.



Figuur 3.13 Dwarsdoorsnede profiel 4.

De bovenkant van de leiding ligt op NAP -2,82 m. De leiding gegevens zijn samengevat in tabel 3.13. De afstand tussen de leidingen is 50 cm en de gronddekking is 1,27 m.

Tabel 3.13 Pijpleidingen profiel 4.

leiding	x (m)	y (m)	r_i (mm)	r_o (mm)	T (°C)
heat return	-0,700	-1,720	346	450	70,0
heat supply	0,700	-1,720	346	450	120,0

4 Model berekeningen

De grondwaterstroming en warmtetransportberekeningen zijn uitgevoerd met het eindige elementen model DgFlow (Van Esch en Kruse (2020)). Grondwaterstroming wordt berekend onder de grondwaterspiegel in de verzadigde zone en boven de grondwaterspiegel in de onverzadigde zone. De grondwaterstroming wordt in dit onderzoek vooral aangedreven door neerslag en verdamping aan het maaiveld. De stroming door warmteverschillen, en dus dichtheidsverschillen, wordt eveneens berekend.

Transport van warmte vindt plaats door geleiding in de ondergrond en door meevoering met het grondwater. DgFlow berekent beide transportprocessen waarbij rekening wordt gehouden met de verandering van de thermische eigenschappen van de grond met variaties van het vochtgehalte. Verzadigde grond heeft namelijk een hogere warmtecapaciteit dan minder verzadigde grond, datzelfde geldt voor de thermische geleidbaarheid.

De grootte van de effectieve neerslag en de verdamping wordt in het DgFlow model berekend op basis van KNMI gegevens. De effectieve neerslag verschilt van de gemeten neerslag als de gemeten neerslag groter is dan de neerslag die door de grond kan worden opgenomen. In dergelijke omstandigheden wordt infiltratie van neerslag beschreven met een waterfilm aan maaiveld die wordt gevormd door plassen aan het maaiveld. De maximale verdamping wordt uitgerekend met de Penmann-Monteith vergelijking (Kroes en Van Dam (2017)). Het model vertaalt deze waarde naar een effectieve waarde op basis van een maximale zuigspanning waarbij verwelking van gewassen optreedt.

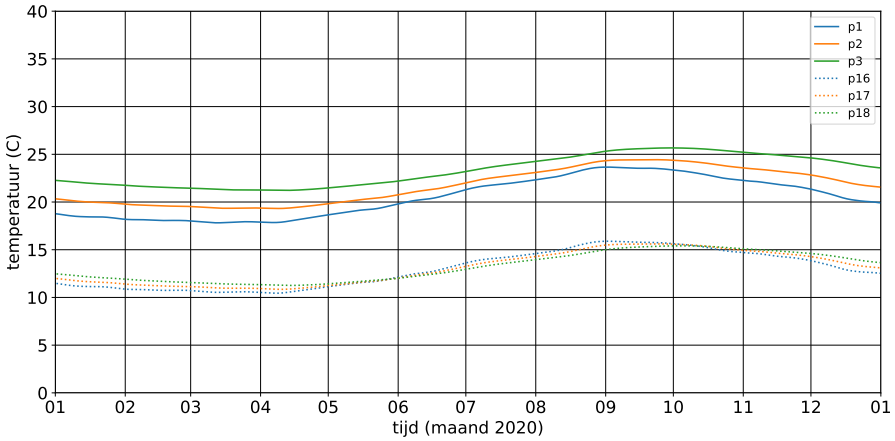
De temperatuur aan maaiveld volgt uit een energiebalansberekening waarbij evenwicht wordt gezocht tussen de latente warmteflux, de bodemwarmteflux, de waarneembare warmteflux en de stralingsflux. De latente warmteflux zorgt voor verdamping en wordt aangedreven door vochtgehalteverschillen in bodem en lucht. De bodemwarmteflux ontstaat door het verschil in oppervlaktetemperatuur, de natuurlijke temperatuur in ondergrond en de additionele warmte door de leidingen in de ondergrond. De waarneembare warmteflux wordt aangedreven door het verschil in bodemtemperatuur en atmosferische temperatuur. De stralingsflux tenslotte, is het gevolg van instraling door de zon en reflectie aan het maaiveld.

In bijlage D is het berekende stijghoogteverloop in de ondergrond voor een winter en zomer situatie per profiel afgebeeld. Het vochtgehalte kan direct worden afgeleid uit de stijghoogte. Bijlage E geeft het temperatuurverloop in de ondergrond voor beide situaties. In bijlage F worden berekende vochtgehaltes en temperaturen in de rekenpunten als maandgemiddelde waarden gepresenteerd. Deze tabellen kunnen gebruikt worden bij de beoordeling van mogelijk schade aan gewassen door de aanleg van de warmteleidingen.

In dit hoofdstuk wordt het vochtgehalteverloop en de bodemtemperatuur voor een zes rekenpunten van tabel 3.5 gepresenteerd voor het jaar 2020. Drie punten liggen 50 cm naast de aanvoerleiding (p2, p3 en p5) en drie punten liggen tien meter naast de leiding (p22, p23 en p25). De punten liggen op een diepte van 50 cm, 100 cm en 200 cm beneden maaiveld. Voor deze punten worden de ook maandgemiddelde waarden gepresenteerd.

Ondergrondprofiel 1

Ondergrondprofiel 1 ligt onder een watergang en de grond is daardoor in het hele profiel verzadigd. De vochtgehaltes komen in dat geval overeen met de porositeit van het materiaal. Voor de geselecteerde rekenpunten is het verloop van de bodemtemperatuur in de tijd weergegeven in figuur 4.1. De temperatuur is het hoogst in het rekenpunt p3 dat 50 cm naast de leidingwand ligt op een diepte van mv -1,00 m. Het punt p18 laat de natuurlijke variatie van de bodemtemperatuur op deze diepte zien. Tabel 4.1 en tabel 4.2 bevatten de maandgemiddelde waarden van de temperatuur in de rekenpunten met en zonder leiding. Uit de tabellen volgt dat de maximale toename van de temperatuur op een diepte van 1 m beneden maaiveld (en 2 m beneden het slootpeil) 13°C is. Op een afstand van 5 m naast de leiding is de afname te verwaarlozen.



Figuur 4.1 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1.

Tabel 4.1 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1 met leidingen.

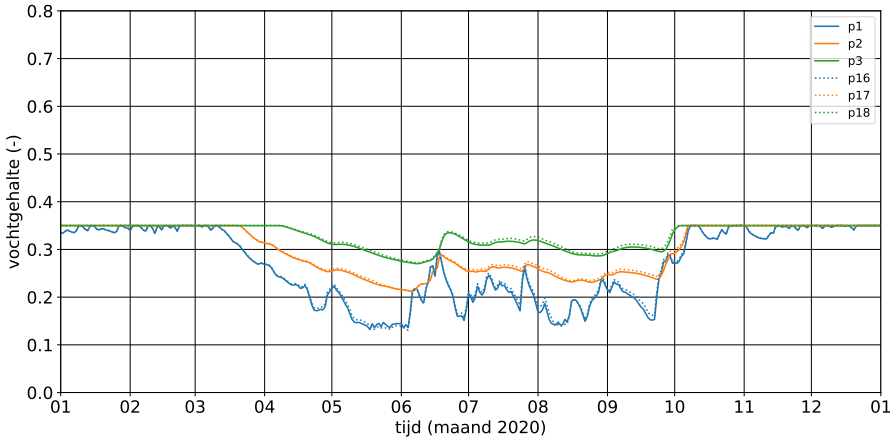
punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	18	18	18	18	19	20	22	23	24	23	22	21
p2	20	20	19	19	20	21	23	24	24	24	23	22
p3	22	22	21	21	22	23	24	25	26	26	25	24
p16	11	11	11	11	12	13	14	15	16	15	14	13
p17	12	11	11	11	12	13	14	15	16	15	15	14
p18	12	12	11	11	12	12	13	14	15	15	15	14

Tabel 4.2 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1 zonder leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	10	9	9	9	10	11	12	13	14	13	12	11
p2	10	9	9	9	10	10	12	13	13	13	12	11
p3	10	10	9	9	10	10	11	12	13	13	12	12
p16	10	9	9	9	10	11	12	13	14	13	12	11
p17	10	9	9	9	10	10	12	13	13	13	12	11
p18	10	10	9	9	10	10	11	12	13	13	12	12

Ondergrondprofiel 2

In figuur 4.2 is het vochtgehalte in de rekenpunten van het tweede profiel weergegeven. De geselecteerde rekenpunten op een diepte van 10 cm, 50 cm en 100 cm liggen in een zandlaag met een porositeit van 0,35. De berekeningen laten zien dat de grond rond de rekenpunten van oktober tot april volledig verzadigd is; het vochtgehalte komt dan overeen met de porositeit. Maandgemiddelde waarden van het vochtgehalte voor de geselecteerde rekenpunten met en zonder warmteleiding zijn weergegeven in tabel 4.3 en tabel 4.4. Volgens de tabel is de afname van het vochtgehalte het grootst in augustus en bedraagt 47% in de bovenste rekenpunten. De afname wordt niet veroorzaakt door de warmteleidingen maar is het gevolg van een grotere verdamping in de zomer dan in de winter.



Figuur 4.2 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2.

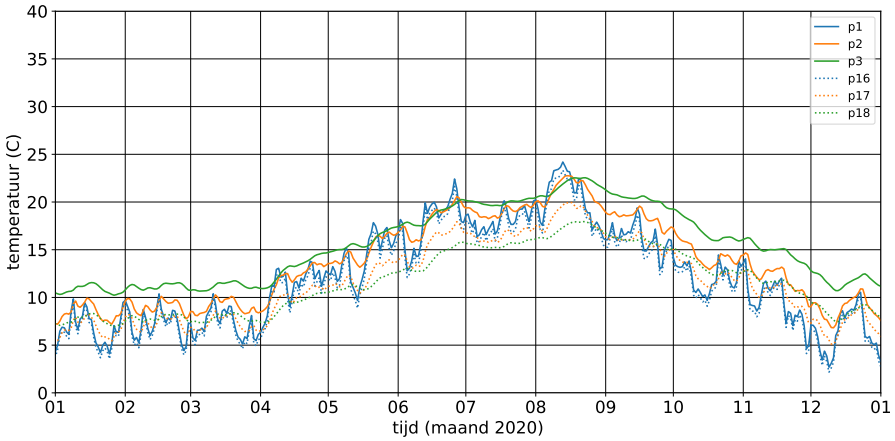
Tabel 4.3 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,21	0,18	0,21	0,33	0,34	0,35
p2	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25	0,34	0,35	0,35
p3	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,31	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35
p16	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,22	0,18	0,22	0,33	0,34	0,35
p17	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,26	0,34	0,35	0,35
p18	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,31	0,35	0,35	0,35

Tabel 4.4 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2 zonder leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,22	0,18	0,22	0,33	0,34	0,35
p2	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,26	0,34	0,35	0,35
p3	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,31	0,35	0,35	0,35
p16	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,22	0,18	0,22	0,33	0,34	0,35
p17	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,26	0,34	0,35	0,35
p18	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,31	0,35	0,35	0,35

Figuur 4.3 geeft het temperatuurverloop in de rekenpunten in het jaar 2020. De variatie van atmosferische condities in de tijd wordt het sterkst waargenomen in de rekenpunten die dicht bij het maaiveld liggen. Dat zijn de punten p1 (50 cm naast de leiding)en p16 (5 m naast de leiding) op een diepte van mv -0,10 m. De temperatuurtoename in punt p3 als gevolg van de leidingen is het grootst in augustus en bedraagt 5°C. Op een diepte van 10 cm is de temperatuurverhoging slechts 1°C. Maandgemiddelde waarden van de temperatuur in de rekenpunten zijn opgenomen in tabel 4.5 en tabel 4.6.



Figuur 4.3 temperatuurverloop rekenpunten profiel 2.

Tabel 4.5 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.

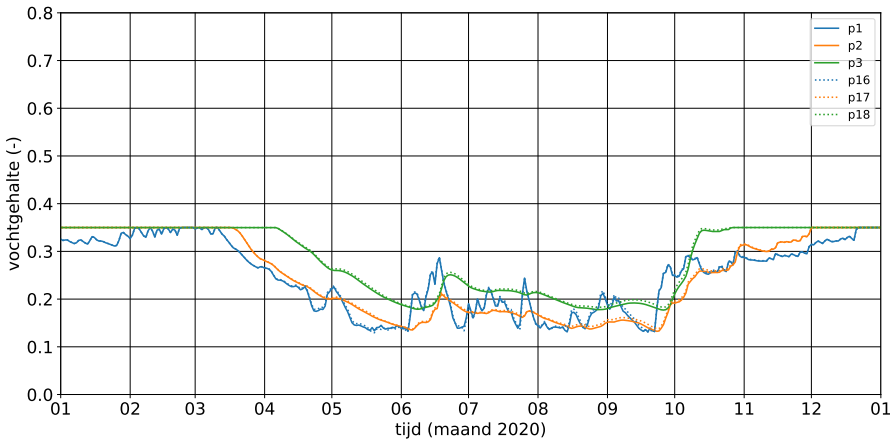
punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	7	7	7	11	14	18	18	21	16	12	10	6
p2	8	9	9	12	15	18	19	21	18	15	12	9
p3	11	11	11	13	16	19	20	22	20	17	15	12
p16	6	7	7	11	13	17	17	20	16	12	9	6
p17	7	7	7	10	12	15	16	18	16	13	10	7
p18	8	8	8	9	11	14	16	17	16	13	12	9

Tabel 4.6 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 2 zonder leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	6	7	7	11	13	17	17	20	15	12	9	6
p2	6	7	7	9	12	15	16	18	15	12	10	7
p3	7	7	7	9	11	13	15	17	15	13	11	8
p16	6	7	7	11	13	17	17	20	15	12	9	6
p17	6	7	7	9	12	15	16	18	15	12	10	7
p18	7	7	7	9	11	13	15	17	15	13	11	8

Ondergrondprofiel 3

In de figuur 4.4 is het berekende vochtgehalteverloop voor zes punten grafisch weergegeven. De rekenpunten liggen in een zandlaag met een porositeit van 0,35. Volgens de figuur is de afname van het vochtgehalte het grootst in augustus in de bovenste rekenpunten (gemiddeld 50%). Deze afname is het gevolg van atmosferische condities en het effect van de warmteleidingen is te verwaarlozen. Maandgemiddelde waarden van het vochtgehalte voor de geselecteerde punten met en zonder warmteleiding zijn opgenomen in tabel 4.7 en tabel 4.8.



Figuur 4.4 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3.

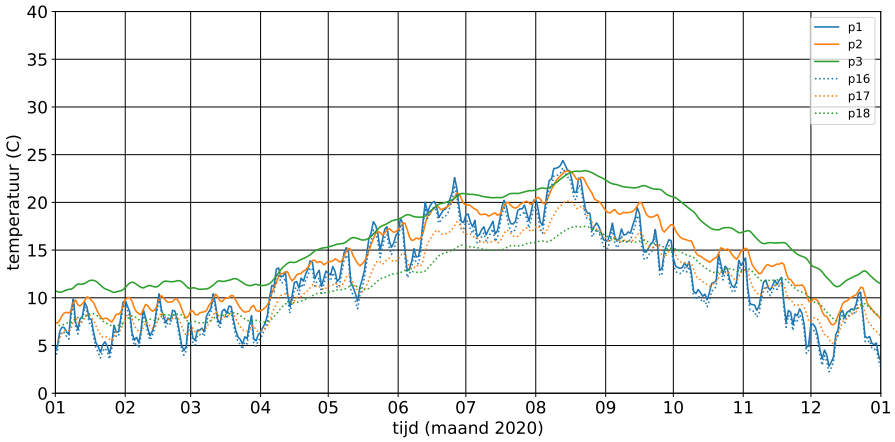
Tabel 4.7 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,18	0,16	0,18	0,27	0,29	0,33
p2	0,35	0,35	0,33	0,24	0,17	0,17	0,17	0,15	0,15	0,25	0,31	0,35
p3	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35
p16	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,19	0,16	0,19	0,27	0,29	0,33
p17	0,35	0,35	0,33	0,24	0,18	0,17	0,17	0,15	0,16	0,25	0,32	0,35
p18	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35

Tabel 4.8 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3 zonder leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,19	0,16	0,19	0,27	0,29	0,34
p2	0,35	0,35	0,33	0,24	0,18	0,17	0,17	0,15	0,16	0,26	0,32	0,35
p3	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35
p16	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,19	0,16	0,19	0,27	0,29	0,34
p17	0,35	0,35	0,33	0,24	0,18	0,17	0,17	0,15	0,16	0,26	0,32	0,35
p18	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35

Figuur 4.5 geeft het berekende temperatuurverloop voor het derde ondergrondprofiel. De temperatuurtoename in augustus is 1°C op een diepte van 10 cm, 4°C op een diepte van 50 cm en 7°C op een diepte van 1 m. De temperatuurstoename op een afstand van 5 m naast de leiding is te verwaarlozen. Maandgemiddelde waarden van de temperatuur in de rekenpunten zijn opgenomen in tabel 4.9 en tabel 4.10.



Figuur 4.5 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3.

Tabel 4.9 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.

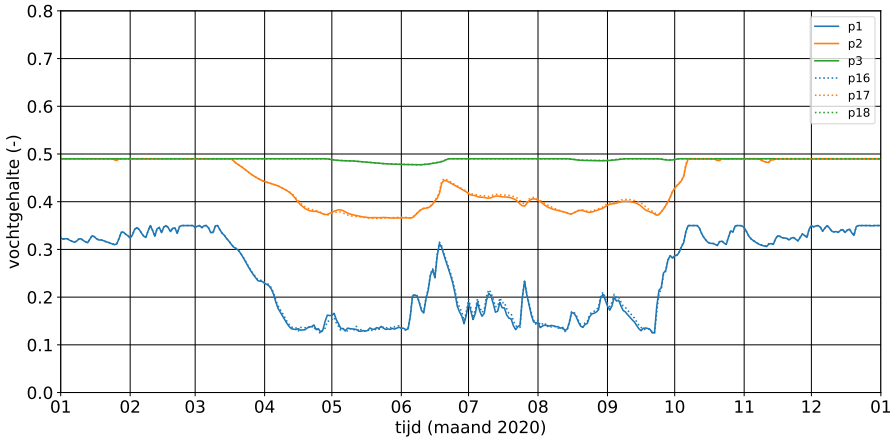
punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	7	7	7	11	14	18	18	21	16	12	10	7
p2	9	9	9	12	15	18	19	22	19	15	13	9
p3	11	11	11	13	17	19	21	23	22	18	16	12
p16	6	7	7	11	13	17	17	20	16	12	9	6
p17	7	7	7	10	12	16	16	18	16	13	11	7
p18	8	8	8	9	11	14	15	17	16	14	12	9

Tabel 4.10 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3 zonder leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	6	7	7	11	13	17	17	20	15	12	9	6
p2	6	7	7	9	12	15	16	18	15	12	10	7
p3	7	7	7	9	11	13	14	16	15	13	11	8
p16	6	7	7	11	13	17	17	20	15	12	9	6
p17	6	7	7	9	12	15	16	18	15	12	10	7
p18	7	7	7	9	11	13	14	16	15	13	11	8

Ondergrondprofiel 4

De geselecteerde rekenpunten op een diepte van 10 cm liggen in een zandlaag en de punten op een diepte van 100 cm beneden maaiveld liggen in een kelilaag. De porositeit van deze lagen is respectievelijk 0,35 en 0,49. De ontwikkeling van het vochtgehalte voor deze punten in het vierde profiel is afgebeeld in figuur 4.6. De afname van het vochtgehalte is het grootst in de bovenste punten (53%), de grond rond de onderste rekenpunten blijft nagenoeg verzadigd. Maandgemiddelde waarden van het vochtgehalte voor de geselecteerde rekenpunten met en zonder warmteleiding zijn weergegeven in tabel 4.11 en tabel 4.12. Uit deze gegevens volgt dat de invloed van de warmteleiding op het vochtgehalte te verwaarlozen is.



Figuur 4.6 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4.

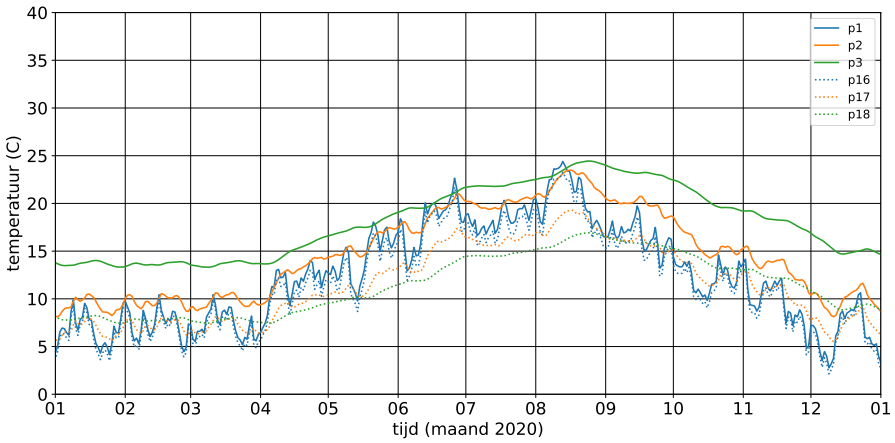
Tabel 4.11 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,17	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p2	0,49	0,49	0,48	0,40	0,37	0,40	0,41	0,38	0,39	0,48	0,49	0,49
p3	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p16	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,18	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p17	0,49	0,49	0,48	0,41	0,37	0,40	0,41	0,39	0,40	0,48	0,49	0,49
p18	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49

Tabel 4.12 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4 zonder leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,18	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p2	0,49	0,49	0,48	0,41	0,37	0,40	0,41	0,38	0,39	0,48	0,49	0,49
p3	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p16	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,18	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p17	0,49	0,49	0,48	0,41	0,37	0,40	0,41	0,38	0,39	0,48	0,49	0,49
p18	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49

Voor de geselecteerde rekenpunten is het temperatuurverloop in de tijd weergegeven in figuur 4.7. De temperatuurtoename als gevolg van de leidingen in het punt p3, op een diepte van 1 m. 50 cm naast de leiding is in augustus 8°C. In de daarboven gelegen punten p2 en p1 blijft de toename beperkt tot 4°C en 1°C. Op een afstand van 5 m naast de leiding wordt de grond tot een diepte van 1 m beneden maaiveld niet beïnvloed door de warmteleiding. Maandgemiddelde waarden van de temperatuur in de punten zijn opgenomen in tabel 4.13 en tabel 4.14.



Figuur 4.7 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4.

Tabel 4.13 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	7	7	7	11	14	18	18	21	17	12	10	7
p2	9	10	10	13	16	19	20	22	20	16	13	10
p3	14	14	14	15	18	20	22	24	23	21	18	15
p16	6	7	7	10	13	17	17	20	16	12	9	6
p17	7	7	7	9	11	15	16	18	16	13	11	7
p18	8	8	8	8	10	13	15	16	16	14	12	9

Tabel 4.14 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4 zonder leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	6	7	7	10	13	17	17	20	16	12	9	6
p2	7	7	7	9	11	15	16	18	16	13	11	7
p3	8	8	8	8	10	12	14	16	15	14	12	9
p16	6	7	7	10	13	17	17	20	16	12	9	6
p17	7	7	7	9	11	15	16	18	16	13	11	7
p18	8	8	8	8	10	12	14	16	15	14	12	9

5 Conclusies

In dit onderzoek is de toename van de temperatuur in de ondergrond en afname van het bodemvochtgehalte als gevolg van de aanleg van WarmtelinQ Vondelingenplaat - Vlaardingen met modelberekeningen vastgesteld. Deze veranderingen in bodemcondities worden in een vervolgonderzoek vertaald naar de effecten op bomen en struiken die zich in de directe omgeving van de leiding bevinden.

In totaal zijn vier locaties langs het leidingtracé onderzocht met een wisselende bodemopbouw en variërende geo-hydrologische condities. De uitkomsten van de berekeningen zijn grafisch weergegeven in een verticale snede rond de leidingen voor een representatieve winter en een zomersituatie. Daarvoor is het jaar 2020 gekozen dat een warm en droog jaar was. Voor de beoordeling van mogelijke schade zijn de resultaten in tabellen met maandgemiddelde waarden van de bodemtemperatuur en het vochtgehalte gepresenteerd.

Het vochtgehalte in de bovenste grondlagen volgt uit het product van de verzadigingsgraad en de porositeit. In het eerste profiel liggen de leidingen onder een sloot en blijft de ondergrond volledig verzadigd. In de overige profielen neemt het vochtgehalte in de bovenste laag met maximaal 47% tot 53% af in de zomer. In alle gevallen is de afname van het vochtgehalte het gevolg van het verschil in atmosferische condities in de winter en de zomer. Het effect van de warmteleiding op het vochtgehalte is verwaarloosbaar.

De variatie van atmosferische condities in de tijd wordt het sterkst waargenomen direct onder maaiveld. Tot een diepte van 50 cm beneden maaiveld zijn de dagelijkse variatie en de seizoensvariatie van de atmosferische condities waarneembaar in de bodemtemperatuur. Daaronder, tot een diepte van zo'n 2 m is alleen de seizoensvariatie waarneembaar. Op een diepte van 10 m is de bodemtemperatuur nagenoeg constant.

De toename van de bodemtemperatuur door de warmteleidingen is het grootst in het eerste profiel en bedraagt 11°C op een diepte van 50 cm beneden de slootbodem, direct naast de aanvoerleiding. De uitwisseling van warmte tussen boven en ondergrond vindt plaats aan het wateroppervlak, 1 m boven de slootbodem. Bij de berekening is aangenomen dat het water in de sloot niet stroomt.

In de overige profielen vindt de uitwisseling plaats aan het maaiveld. Direct naast de leiding op een afstand van 50 cm is de maximale temperatuursverhoging 8°C en op een diepte van 1 m, 4°C en op een diepte van 50 cm en 1°C op een diepte van 10 cm. Vijf meter naast de leiding blijft de temperatuurtoename op dezelfde dieptes beperkt tot maximaal 1°C.

6 Aanbevelingen

Bij de berekeningen is gebruik van eigenschappen van de ondergrond die op basis van literatuuronderzoek zijn verzameld. Bij voorkeur zouden de thermische eigenschappen van de ondergrond (geleidbaarheid en warmtecapaciteit) langs het tracé van de warmteleidingen in het geo-technisch laboratorium moeten worden bepaald bij verschillende vochtgehaltes en zouden pf-curves moeten worden gemaakt (verzadigingsgraad – zuigspanning – doorlatendheid relatie). Ook zou het meten van de bodemtemperatuur en het vochtgehalte voorafgaand aan de aanleg van de warmteleidingen nuttig zijn. De initiële condities kunnen dan beter worden vastgesteld.

Literatuur

"Daggegevens van het weer in Nederland." http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi. Accessed: 06-01-2021.

Kroes, J. en J. Van Dam, 2017. *SWAP version 4, Theory description and user manual*. Wageningen University and Research.

TNO, 2020a. "dinoloket, ondergrondgegevens, https://www.dinoloket.nl//ondergrondgegevens."

TNO, 2020b. "Landelijk hydrologisch model LHN, https://www.grondwatertools.nl//gwsinbeeld."

TNO, 2022. "Grondwatertools, https://www.grondwatertools.nl."

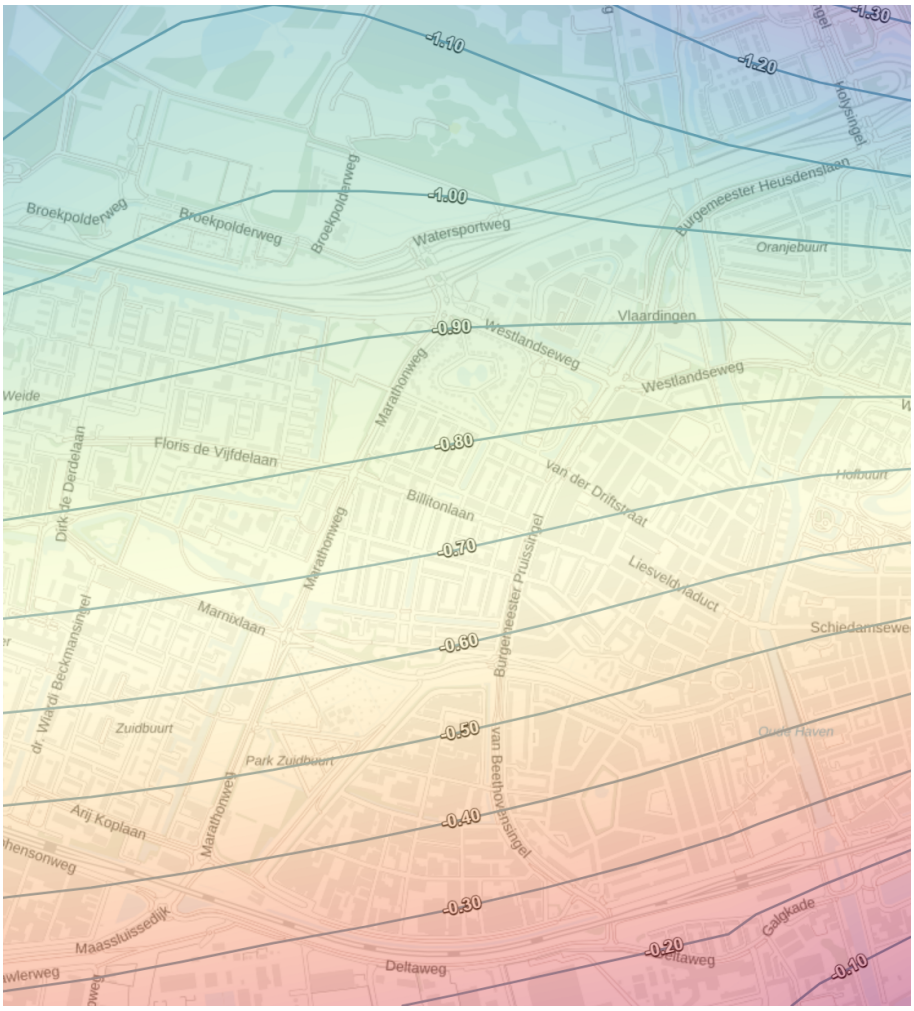
Van Esch, J. en H. Kruse, 2020. "Thermal effects of heat supply pipelines on their surroundings; model development and validation." *Deltares report 11205411-001-GEO-001* .

Van Esch, J., J. Wesseling en H. Kruse, 2021. "Warmteoverdracht agrarische percelen; warmteleidingen Vlaardingen Den Haag." *Deltares report 11208647-002-GEO-00014* .

Wesseling, J. en A. Heidema, 2023. "De bodems die de warmteleiding doorkruist tussen Rijswijk en Leiden." *Wageningen Environmental Software Rapprt xx* .

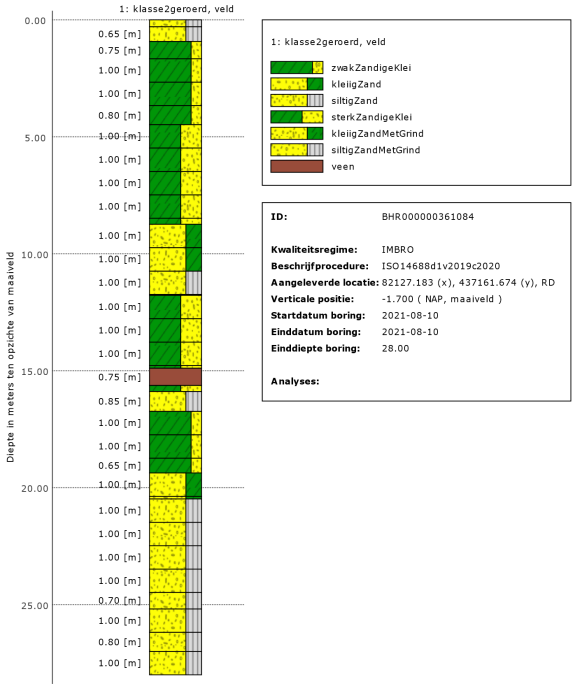
Wösten, J., G. Veerman, W. De Groot en J. Stolte, 2001. "Water retention and hydraulic conductivity functions of top- and subsoilin the Netherlands: The Staring Series." *Alterra report 153* .

A Grondwaterstanden

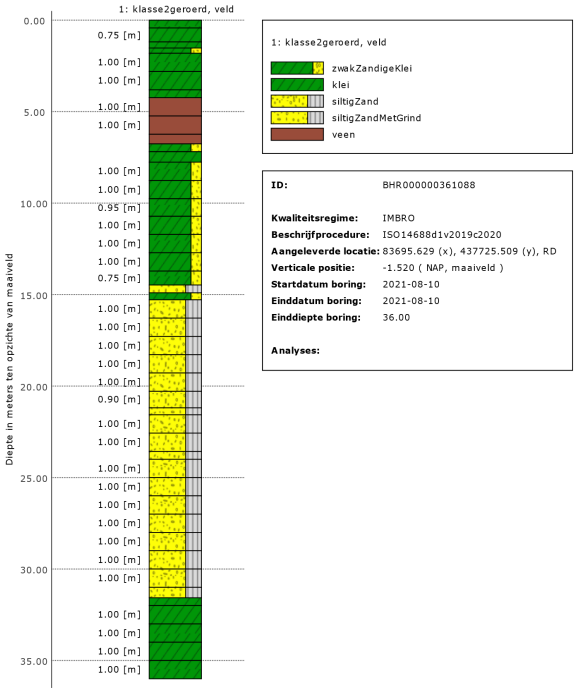


Figuur A.1 Grondwaterstanden eerste watervoerend pakket.

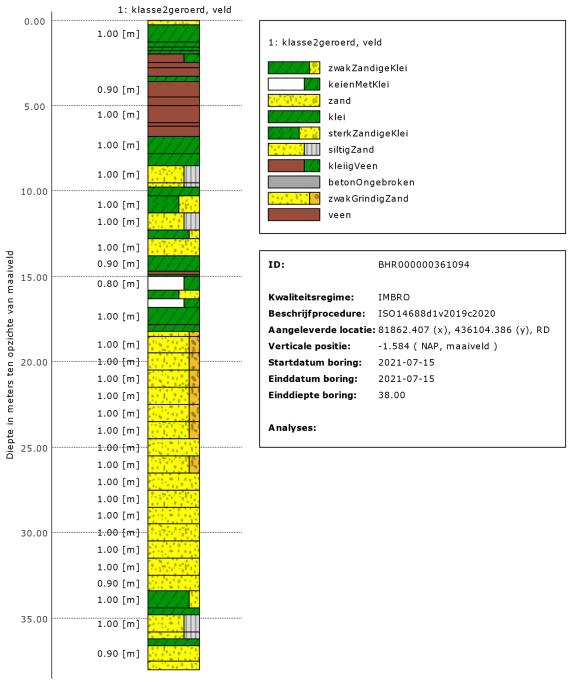
B Bodembeschrijvingen



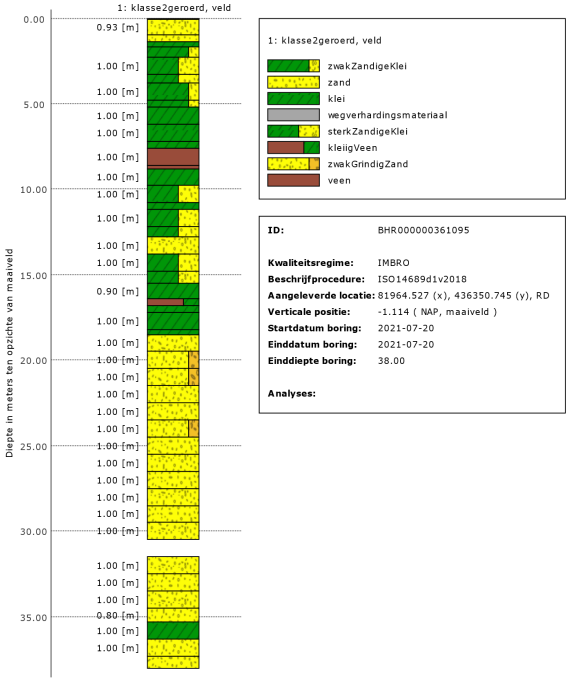
Figuur B.1 Boorbeschrijving B1084, profiel 1.



Figuur B.2 Boorbeschrijving B1088, profiel 2.

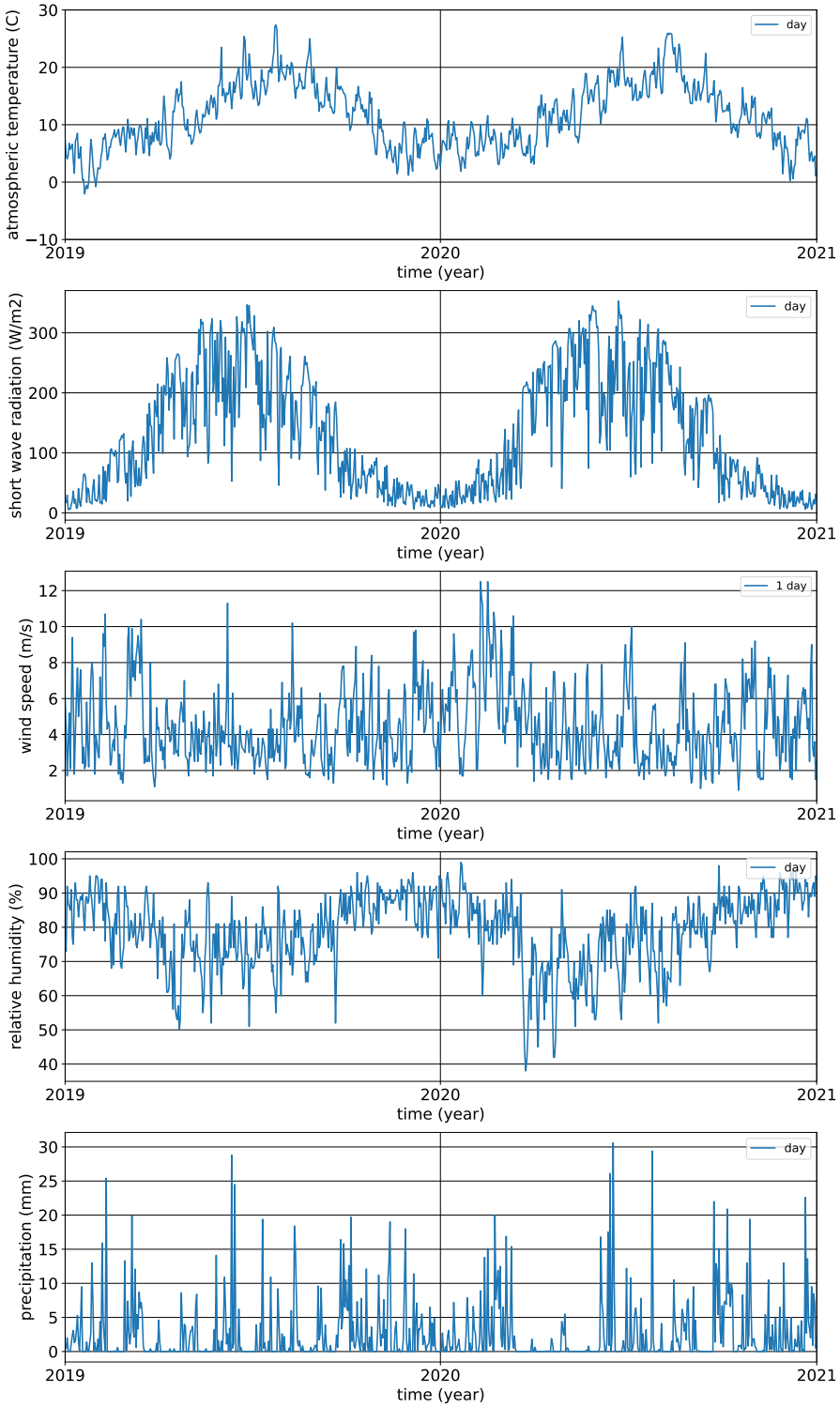


Figuur B.3 Boorbeschrijving B1094, profiel 3.



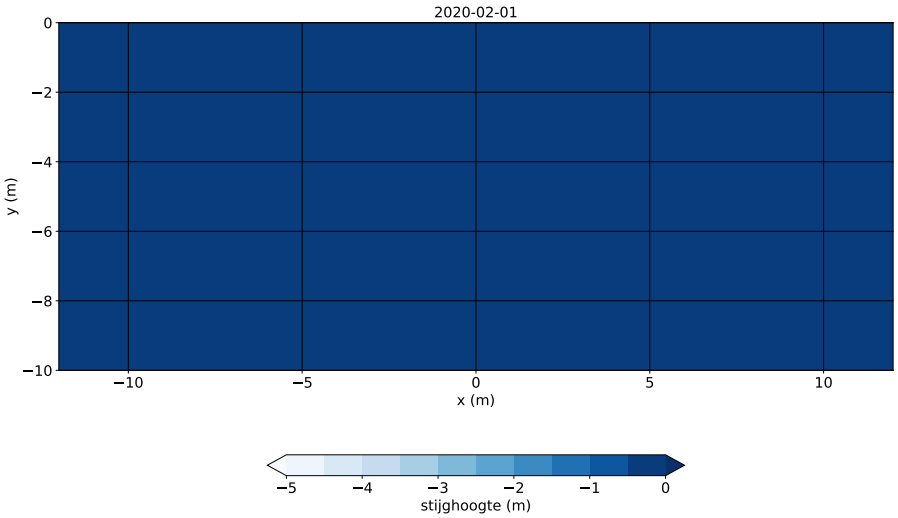
Figuur B.4 Boorbeschrijving B1095, profiel 4.

C Atmosferische condities

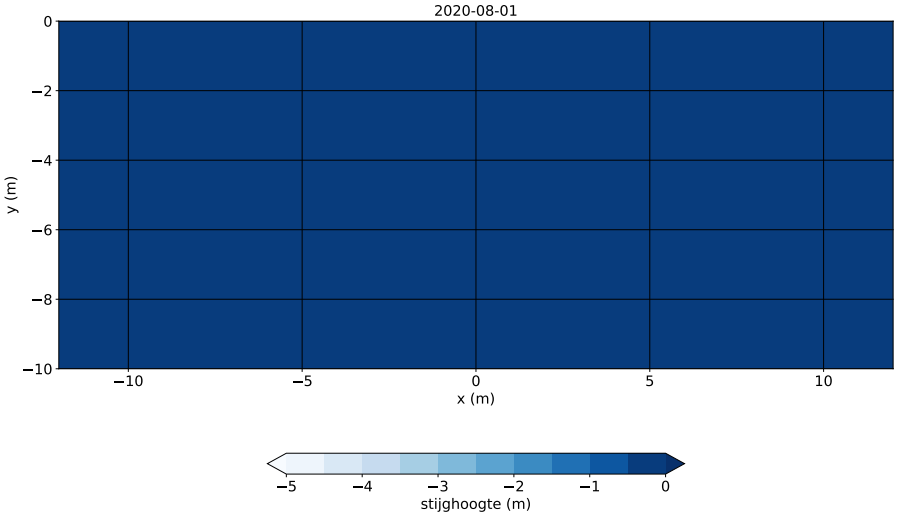


Figuur C.1 KNMI metingen weerstation Voorschoten.

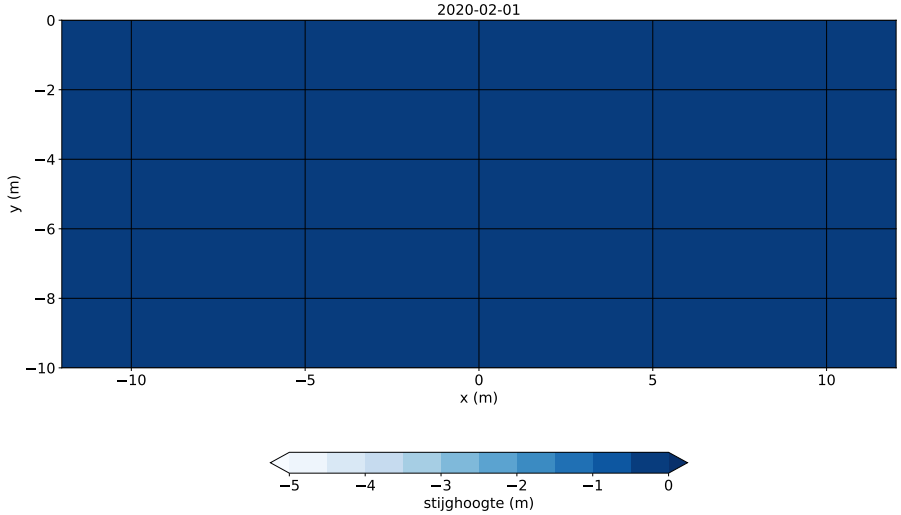
D Stijghoogteverloop ondergrond



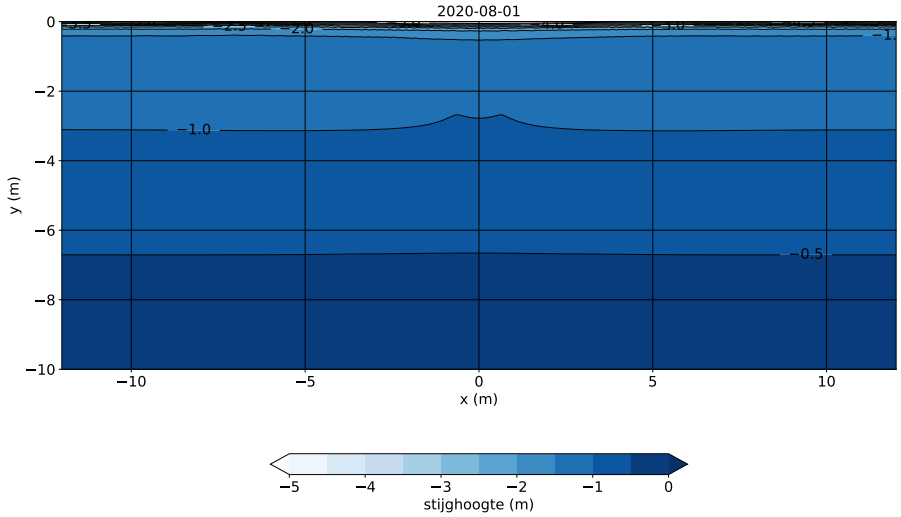
Figuur D.1 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 1, 1 februari 2020.



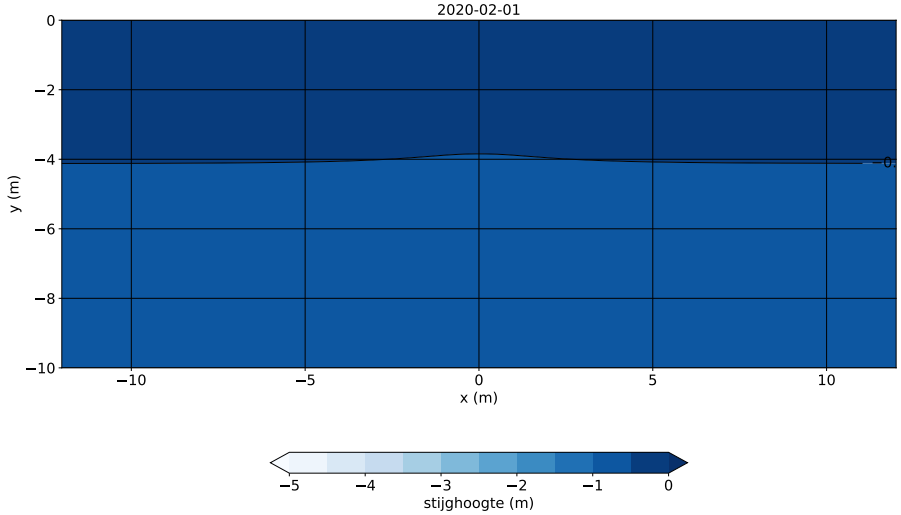
Figuur D.2 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 1, 1 augustus 2020.



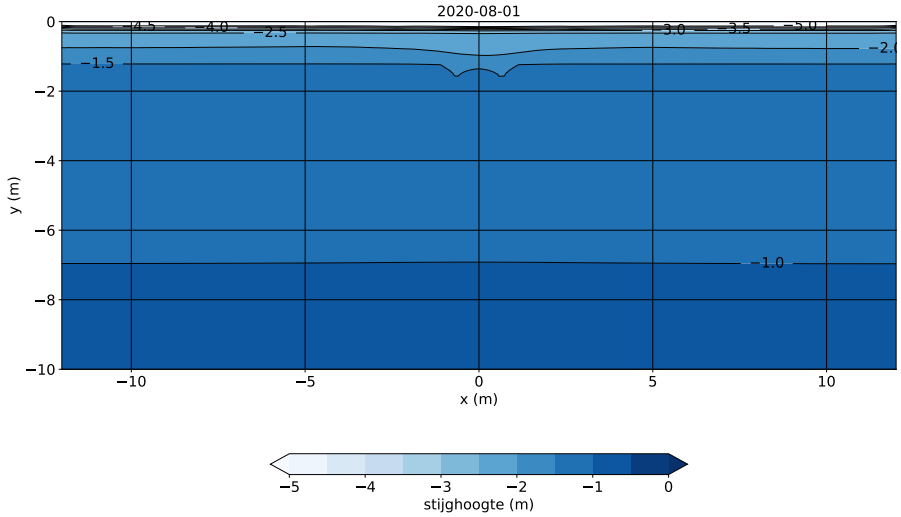
Figuur D.3 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 2, 1 februari 2020.



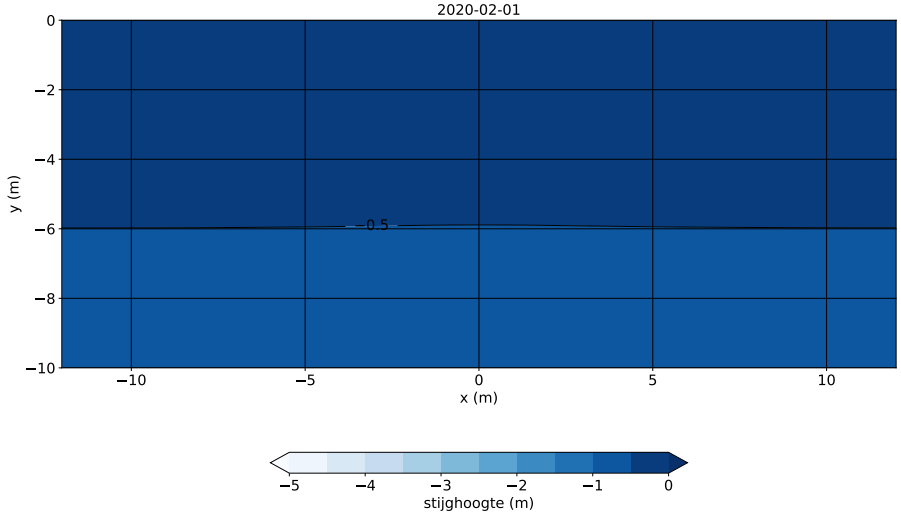
Figuur D.4 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 2, 1 augustus 2020.



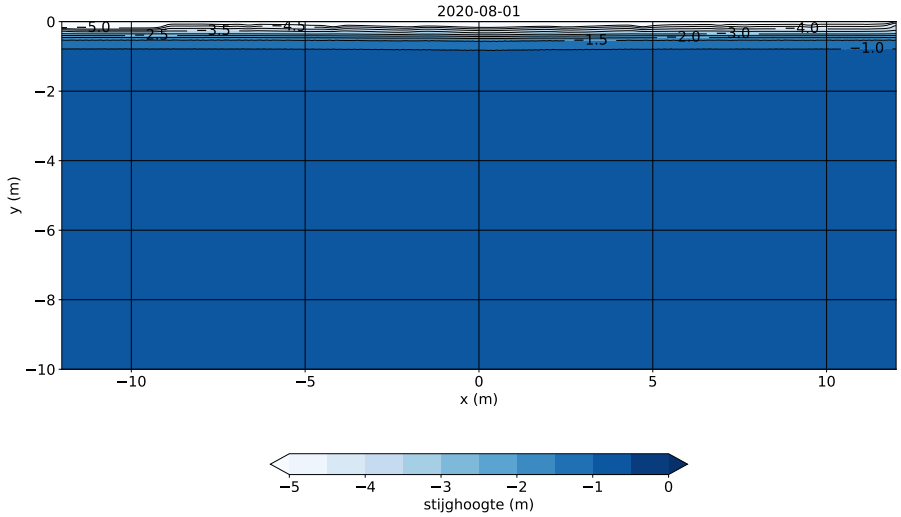
Figuur D.5 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 2, 1 februari 2020.



Figuur D.6 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 3, 1 augustus 2020.

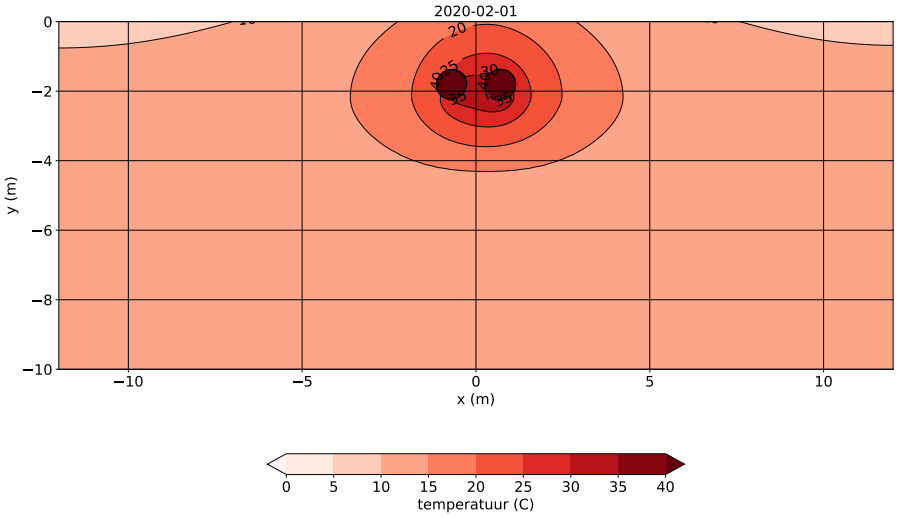


Figuur D.7 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 4, 1 februari 2020.

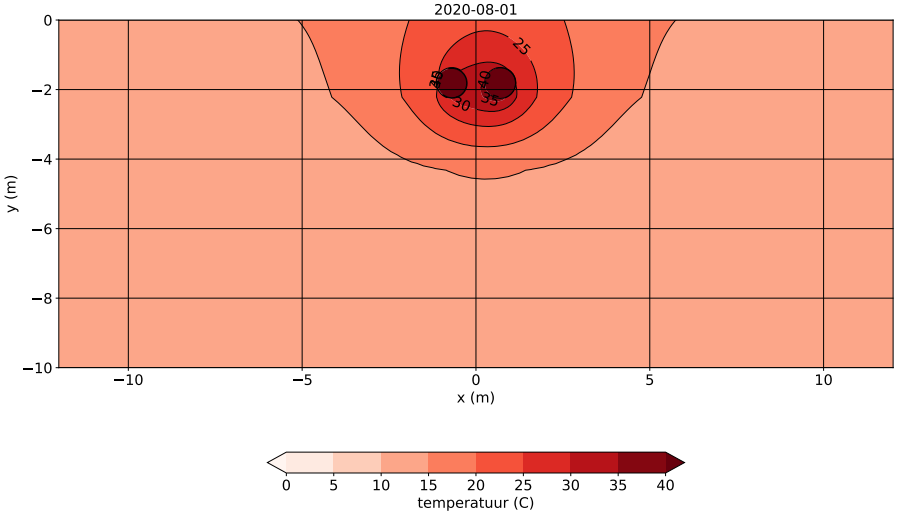


Figuur D.8 Stijghoogteverloop ondergrond profiel 4, 1 augustus 2020.

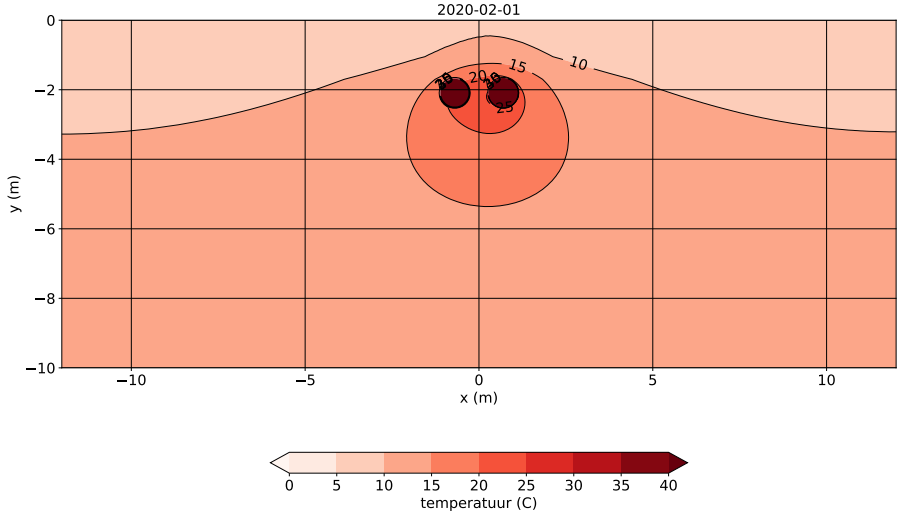
E temperatuurverloop ondergrond



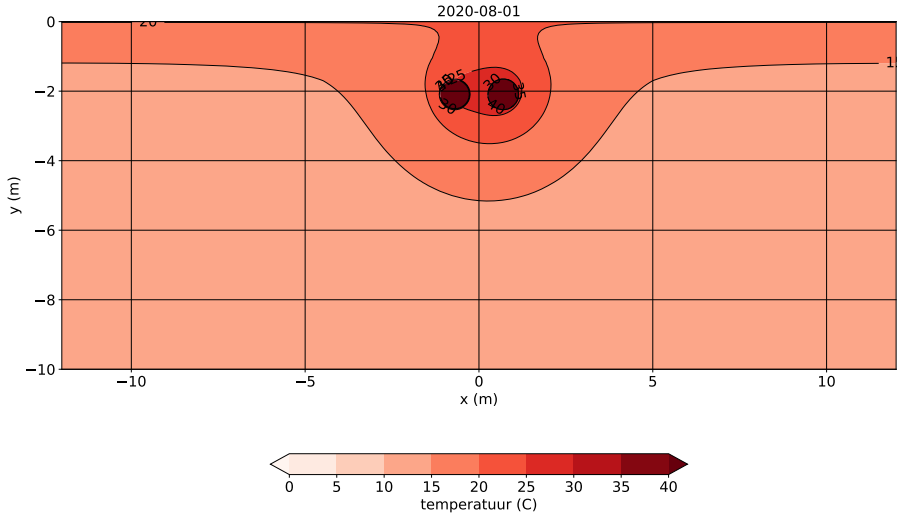
Figuur E.1 Temperatuurverloop ondergrond profiel 1, 1 februari 2020.



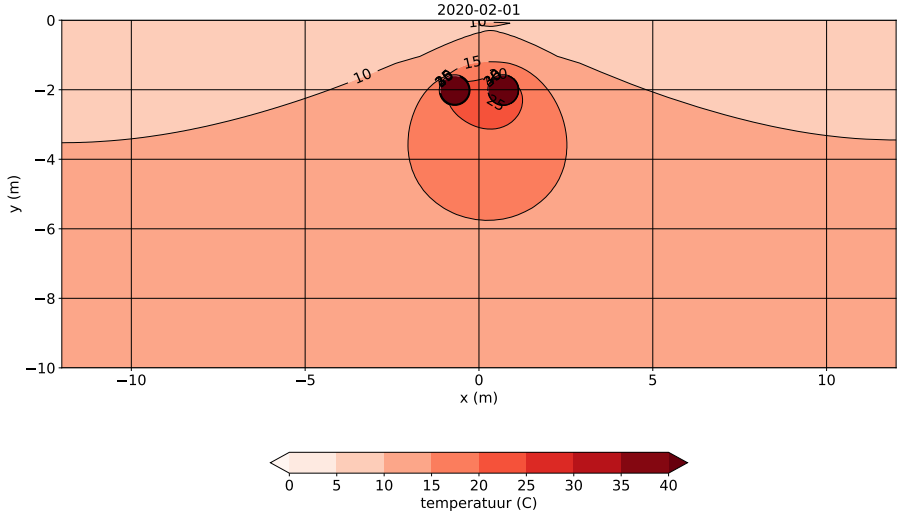
Figuur E.2 Temperatuurverloop ondergrond profiel 1, 1 augustus 2020.



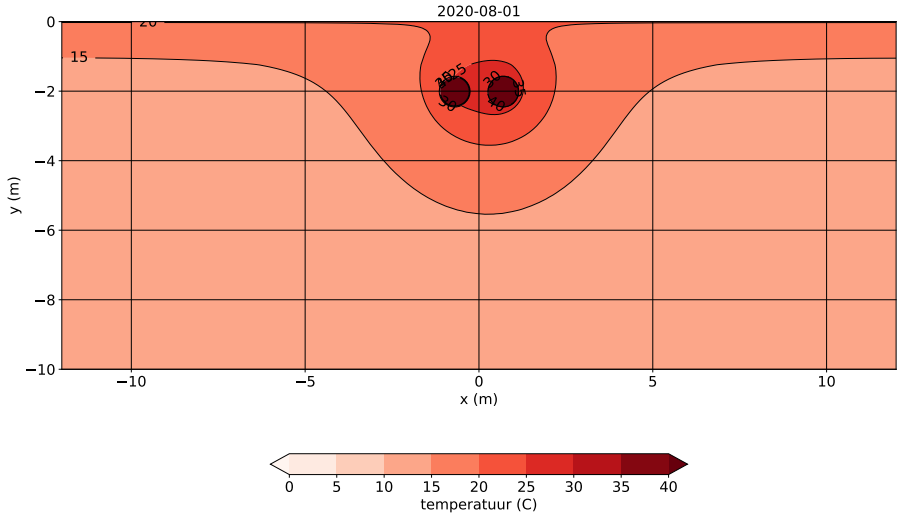
Figuur E.3 Temperatuurverloop ondergrond profiel 2, 1 februari 2020.



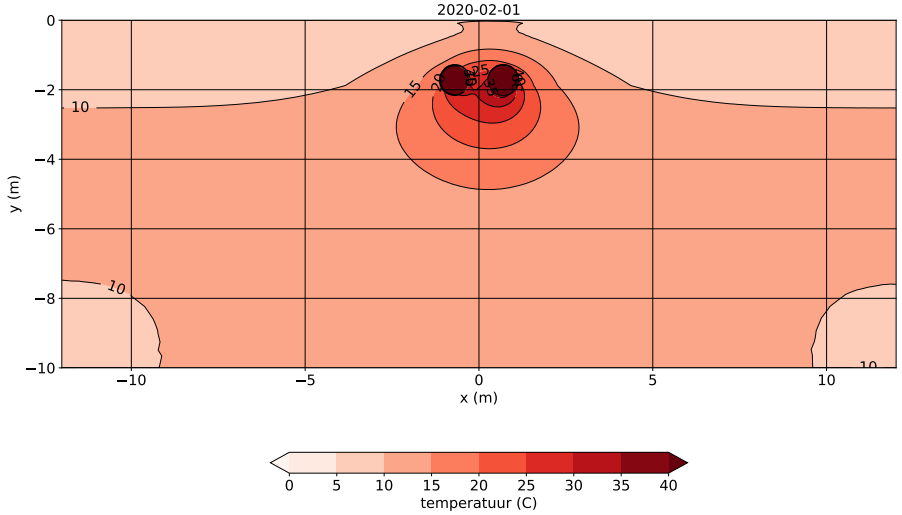
Figuur E.4 Temperatuurverloop ondergrond profiel 2, 1 augustus 2020.



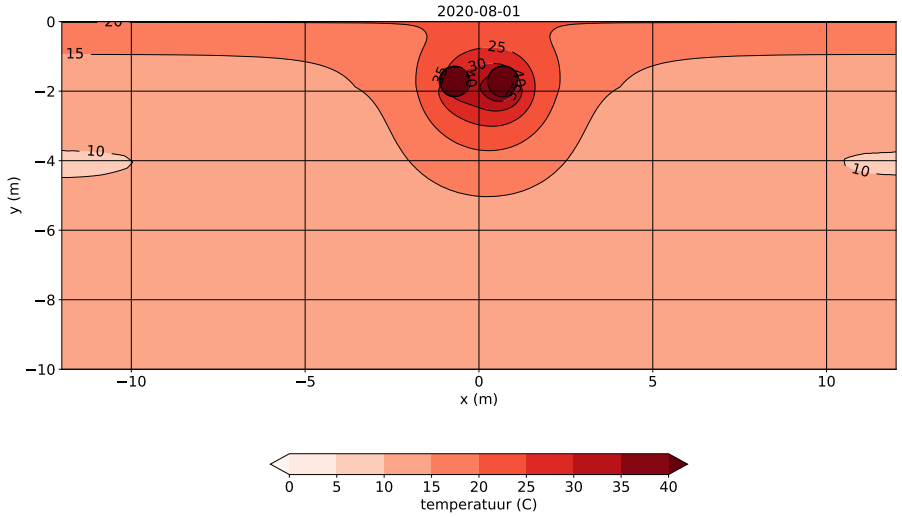
Figuur E.5 Temperatuurverloop ondergrond profiel 3, 1 februari 2020.



Figuur E.6 Temperatuurverloop ondergrond profiel 3, 1 augustus 2020.



Figuur E.7 Temperatuurverloop ondergrond profiel 4, 1 februari 2020.



Figuur E.8 Temperatuurverloop ondergrond profiel 4, 1 augustus 2020.

F Beoordelingstabellen

Tabel F.1 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 1 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p2	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p3	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p4	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p5	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p6	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p7	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p8	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p9	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p10	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p11	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p12	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p13	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p14	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p15	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p16	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p17	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p18	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p19	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p20	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p21	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p22	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p23	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p24	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p25	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56

Tabel F.2 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 1 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	18	18	18	18	19	20	22	23	24	23	22	21
p2	20	20	19	19	20	21	23	24	24	24	23	22
p3	22	22	21	21	22	23	24	25	26	26	25	24
p4	24	23	23	23	23	24	25	26	27	27	26	26
p5	25	24	24	24	24	25	25	26	27	27	27	27
p6	17	17	17	17	18	19	21	22	22	22	21	19
p7	19	18	18	18	19	20	21	22	23	23	22	21
p8	20	20	19	19	20	21	22	23	24	24	23	22
p9	21	21	21	20	21	21	22	23	24	24	24	23
p10	22	21	21	21	21	22	22	23	24	24	24	24
p11	15	15	14	15	16	17	18	19	20	19	18	17
p12	16	16	15	15	16	17	18	19	20	20	19	18
p13	17	16	16	16	17	17	18	19	20	20	20	19
p14	18	17	17	17	17	18	18	19	20	20	20	20
p15	18	17	17	17	17	18	18	19	20	20	20	20
p16	11	11	11	11	12	13	14	15	16	15	14	13
p17	12	11	11	11	12	13	14	15	16	15	15	14
p18	12	12	11	11	12	12	13	14	15	15	15	14
p19	13	12	12	12	12	12	13	14	15	15	15	14
p20	13	12	12	12	12	12	13	14	15	15	15	15
p21	10	9	9	9	10	11	13	14	14	14	13	11
p22	10	10	9	9	10	11	12	13	14	14	13	12
p23	11	10	10	10	10	11	12	13	13	13	13	12
p24	11	10	10	10	10	10	11	12	13	13	13	12
p25	11	10	10	10	10	10	11	12	13	13	13	12

Tabel F.3 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,21	0,18	0,21	0,33	0,34	0,35
p2	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25	0,34	0,35	0,35
p3	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,31	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35
p4	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p5	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p6	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,22	0,18	0,21	0,33	0,34	0,35
p7	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25	0,34	0,35	0,35
p8	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,30	0,35	0,35	0,35
p9	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p10	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p11	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,22	0,18	0,22	0,33	0,34	0,35
p12	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,26	0,34	0,35	0,35
p13	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,31	0,35	0,35	0,35
p14	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p15	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p16	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,22	0,18	0,22	0,33	0,34	0,35
p17	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,26	0,34	0,35	0,35
p18	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,31	0,35	0,35	0,35
p19	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p20	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p21	0,34	0,35	0,32	0,22	0,16	0,21	0,22	0,18	0,22	0,33	0,34	0,35
p22	0,35	0,35	0,34	0,28	0,24	0,25	0,26	0,24	0,26	0,34	0,35	0,35
p23	0,35	0,35	0,35	0,34	0,30	0,30	0,32	0,30	0,31	0,35	0,35	0,35
p24	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p25	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56

Tabel F.4 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 2 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	7	7	7	11	14	18	18	21	16	12	10	6
p2	8	9	9	12	15	18	19	21	18	15	12	9
p3	11	11	11	13	16	19	20	22	20	17	15	12
p4	15	15	15	15	17	19	21	22	22	20	18	16
p5	17	17	17	17	19	20	22	23	23	22	21	19
p6	7	7	7	11	14	18	18	20	16	12	9	6
p7	8	9	9	11	14	17	18	21	18	14	12	8
p8	10	10	10	12	15	17	19	21	19	16	14	11
p9	13	13	13	14	16	18	19	20	20	19	17	14
p10	15	15	15	15	16	18	19	20	21	20	18	17
p11	6	7	7	11	14	17	18	20	16	12	9	6
p12	7	8	8	11	13	17	18	20	17	13	11	8
p13	9	9	9	11	13	16	17	19	18	15	13	10
p14	11	11	11	11	13	15	17	18	18	16	15	13
p15	13	12	12	12	14	15	16	18	18	17	16	14
p16	6	7	7	11	13	17	17	20	16	12	9	6
p17	7	7	7	10	12	15	16	18	16	13	10	7
p18	8	8	8	9	11	14	16	17	16	13	12	9
p19	9	9	9	9	11	13	14	16	16	14	13	10
p20	10	9	9	10	11	12	13	15	15	14	13	12
p21	6	7	7	11	13	17	17	20	15	12	9	6
p22	7	7	7	9	12	15	16	18	16	12	10	7
p23	7	8	7	9	11	13	15	17	15	13	11	8
p24	8	8	8	9	10	12	14	15	15	13	12	10
p25	9	9	9	9	10	11	13	14	14	13	12	11

Tabel F.5 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,18	0,16	0,18	0,27	0,29	0,33
p2	0,35	0,35	0,33	0,24	0,17	0,17	0,17	0,15	0,15	0,25	0,31	0,35
p3	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35
p4	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p5	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p6	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,19	0,16	0,18	0,27	0,29	0,33
p7	0,35	0,35	0,33	0,24	0,17	0,17	0,17	0,15	0,15	0,25	0,31	0,35
p8	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35
p9	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p10	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p11	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,19	0,16	0,18	0,27	0,29	0,33
p12	0,35	0,35	0,33	0,24	0,17	0,17	0,17	0,15	0,15	0,25	0,31	0,35
p13	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35
p14	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p15	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p16	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,19	0,16	0,19	0,27	0,29	0,33
p17	0,35	0,35	0,33	0,24	0,18	0,17	0,17	0,15	0,16	0,25	0,32	0,35
p18	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35
p19	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p20	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p21	0,32	0,34	0,31	0,22	0,16	0,19	0,19	0,16	0,19	0,27	0,29	0,33
p22	0,35	0,35	0,33	0,24	0,18	0,17	0,17	0,15	0,16	0,26	0,32	0,35
p23	0,35	0,35	0,35	0,32	0,23	0,21	0,22	0,19	0,19	0,32	0,35	0,35
p24	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
p25	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56

Tabel F.6 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 3 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	7	7	7	11	14	18	18	21	16	12	10	7
p2	9	9	9	12	15	18	19	22	19	15	13	9
p3	11	11	11	13	17	19	21	23	22	18	16	12
p4	15	14	14	16	18	20	22	23	23	21	19	16
p5	17	17	16	17	19	20	22	23	24	22	21	19
p6	7	7	7	11	14	18	18	20	16	12	10	6
p7	8	9	9	12	14	18	19	21	18	15	12	9
p8	10	11	10	12	15	18	19	21	20	17	15	11
p9	13	13	13	14	16	18	20	21	21	19	17	15
p10	15	14	14	15	16	18	20	21	21	20	19	17
p11	6	7	7	11	14	18	18	20	16	12	9	6
p12	7	8	8	11	13	17	18	20	17	14	12	8
p13	9	9	9	11	13	16	17	19	18	15	13	10
p14	11	11	11	12	14	16	17	19	19	17	15	13
p15	12	12	12	12	14	15	17	18	19	18	16	14
p16	6	7	7	11	13	17	17	20	16	12	9	6
p17	7	7	7	10	12	16	16	18	16	13	11	7
p18	8	8	8	9	11	14	15	17	16	14	12	9
p19	9	9	9	9	11	13	14	16	16	14	13	10
p20	10	9	9	9	11	12	14	15	15	14	13	11
p21	6	7	7	11	13	17	17	20	15	12	9	6
p22	7	7	7	9	12	15	16	18	15	12	10	7
p23	7	8	7	9	11	13	15	16	15	13	11	8
p24	8	8	8	9	10	12	14	15	15	13	12	10
p25	9	9	8	9	10	11	13	14	14	13	12	11

Tabel F.7 Vochtgehalteverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,17	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p2	0,49	0,49	0,48	0,40	0,37	0,40	0,41	0,38	0,39	0,48	0,49	0,49
p3	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p4	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p5	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
p6	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,17	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p7	0,49	0,49	0,48	0,41	0,37	0,40	0,41	0,38	0,39	0,48	0,49	0,49
p8	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p9	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p10	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
p11	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,18	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p12	0,49	0,49	0,48	0,41	0,37	0,40	0,41	0,38	0,39	0,48	0,49	0,49
p13	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p14	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p15	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
p16	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,18	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p17	0,49	0,49	0,48	0,41	0,37	0,40	0,41	0,39	0,40	0,48	0,49	0,49
p18	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p19	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p20	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
p21	0,32	0,34	0,31	0,16	0,14	0,21	0,18	0,15	0,18	0,33	0,32	0,34
p22	0,49	0,49	0,48	0,41	0,37	0,40	0,41	0,39	0,40	0,48	0,49	0,49
p23	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p24	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
p25	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

Tabel F.8 Temperatuurverloop rekenpunten profiel 4 met leidingen.

punt	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
p1	7	7	7	11	14	18	18	21	17	12	10	7
p2	9	10	10	13	16	19	20	22	20	16	13	10
p3	14	14	14	15	18	20	22	24	23	21	18	15
p4	18	17	17	18	20	22	24	25	26	24	22	20
p5	20	20	20	20	21	22	24	25	26	26	24	23
p6	7	7	7	11	14	18	18	21	16	12	10	6
p7	8	9	9	12	14	18	19	21	19	15	13	9
p8	12	12	12	13	15	18	20	21	21	19	17	14
p9	15	14	14	15	16	18	20	22	22	21	19	17
p10	16	16	16	16	17	19	20	21	22	22	21	19
p11	6	7	7	11	14	17	18	20	16	12	9	6
p12	8	8	8	10	13	16	17	19	17	14	12	8
p13	10	10	10	10	13	15	17	19	18	16	14	11
p14	11	11	11	11	13	15	17	18	19	18	16	14
p15	13	12	12	12	13	14	16	17	18	18	17	15
p16	6	7	7	10	13	17	17	20	16	12	9	6
p17	7	7	7	9	11	15	16	18	16	13	11	7
p18	8	8	8	8	10	13	15	16	16	14	12	9
p19	9	8	8	8	10	11	13	15	15	14	13	11
p20	10	9	9	9	10	11	12	14	15	14	13	12
p21	6	7	7	10	13	17	17	20	16	12	9	6
p22	7	7	7	9	11	15	16	18	16	13	11	7
p23	8	8	8	8	10	12	14	16	16	14	12	9
p24	9	8	8	8	9	11	13	14	15	14	13	10
p25	9	9	8	8	9	10	12	13	14	14	13	11

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