



KWR 2026.065 | Augustus 2026

De invloed van elektriciteitskabels op de drinkwatertemperatuur

Eindrapport TKI Engine-E

Samenwerkingspartners



Colofon

De invloed van elektriciteitskabels op de drinkwatertemperatuur

Eindrapport TKI Engine-E

KWR 2026.065 | Augustus 2026

Projectnummer

405081

Projectmanager

ir. R.H.S. (Ralph) Beuken

Samenwerkingspartners (projectgroep)

Roel Diemel (Brabant Water); Marnix de Goede (Dunea); Joris Gallé (Liander); Lucien de Kind (Vitens); Wim Lafeber (WML); Barry Leguijt (PWN); Jos Meijerink (Enexis); Ailina Tsumebayeva (DNV); Peter van Velzen (Stedin); Frank de Wild (DNV)

Auteur(s)

dr. D. (Djordje) Mitrovic; dr. G. (Guillermo) Mier (DNV); dr. J. (Johan) Hansson (DNV); dr. N. (Narges) Esfandiar; dr. A. (Amitosh) Dash; dr. ir. K.A. (Karel) van Laarhoven

Kwaliteitsborger(s)

dr. ir. E.J.M. (Mirjam) Blokker

Verzonden naar (stuurgroep)

Anke van Dellen (Vewin); Christian Kivit (Vewin); Jos Lemmens (Netbeheer Nederland); Lars Paardekoper (Netbeheer Nederland)

Deze activiteit is mede gefinancierd met PPS-financiering uit de Toeslag voor Topconsortia voor Kennis en Innovatie (TKI's) van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de resultaten zijn openbaar.

Werkwijzen, rekenmodellen, technieken, ontwerpen van proefinstallaties, prototypen en door KWR gedane voorstellen en ideeën alsmede instrumenten, waaronder software, die in het onderzoeksresultaat zijn opgenomen, zijn en blijven het eigendom van KWR. Ook alle rechten die voortvloeien uit intellectueel en industrieel eigendom, alsmede de auteursrechten, blijven bij KWR berusten en derhalve eigendom van KWR.

Keywords

Elektriciteitskabel, Eindig-element modellering, Drinkwatertemperatuur, Opwarming

Jaar van publicatie
2026

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

Meer informatie
dr. ir. K.A. van Laarhoven
T +31 (0)30 6069697
E karel.van.laarhoven@kwrwater.nl

T +31 (0)30 60 69 511
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

The logo for KWR, consisting of the letters 'KWR' in a stylized, bold, blue font.

Augustus 2026 ©

Alle rechten voorbehouden aan KWR. Niets uit deze uitgave mag - zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van KWR - worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier.

Samenvatting

De Drinkwaterwet vereist dat de temperatuur van drinkwater aan de tap niet hoger is dan 25°C. Een hogere temperatuur is nadelig voor de kwaliteit van het drinkwater. Opwarming kan plaatsvinden door bovengrondse warmte, inclusief (warme) weersomstandigheden, maar ook door aanwezigheid van warmtebronnen in de ondergrond. De komende jaren zal een verdergaande elektrificatie van diverse sectoren plaatsvinden. Netbeheerders elektra leggen momenteel veel nieuwe kabels aan en hebben ambities om de komende jaren het aanlegtempo te verhogen. Daarbij komt de vraag op of hierdoor de totale warmteafgifte naar de omgeving toeneemt, en wat dat voor consequenties kan hebben voor de drinkwatertemperatuur.

Het voorliggende rapport beschrijft modelmatig onderzoek dat tot doel heeft inzicht te bieden in de bijdrage van elektriciteitskabels aan de toename van de drinkwatertemperatuur in het leidingnet. Het verkregen inzicht heeft als doel om inhoudelijk houvast te bieden tijdens het opstellen van sectorafspraken tussen drinkwaterbedrijven en netbeheerders over voorkeursafstanden tussen kabels en leidingen. Eerder werden sectorafspraken rond warmtenetten op vergelijkbare wijze begeleid.

De invloed van kabels op de drinkwatertemperatuur is uitgezocht met behulp van een getrappt model dat is gevoed door een inventarisatie van relevante toekomstige liggingssituaties (aangeleverd door de netbeheerders) en door de overdraagbare uitgangspunten uit onderzoek naar de invloed van warmtenetten (eerder uitgevoerd door de drinkwatersector). In de eerste modeltrap is met eindige-elementenmethoden (het op FEM gebaseerde model BTM+) voor een representatieve verzameling van lokale liggingssituaties uitgezocht wat daar de thermische beïnvloeding is. In de tweede modeltrap is het inzicht in die lokale beïnvloeding vervolgens vertaald naar de context van een stadsbreed gebied dat is opgebouwd uit (een combinatie van) dergelijke lokale situaties. Met behulp van hydraulische berekeningen (het op EPANET-MSX gebaseerde Watertemperatuurmodel WTM+) is uitgezocht wat de thermische beïnvloeding is op stadsbreed niveau. Ter controle van die modelaanpak zijn veldmetingen aan een liggingssituatie in Poederloijen vergeleken met de uitkomsten van een modelmatige reproductie van die situatie.

De uitkomsten wijzen uit dat met name de gemiddelde belasting van de kabels (o.a. bepaald door de redundantie en utilizatiefactor in het ontwerp van kabels) en de stedelijke dichtheid van de zwaardere bundels van middenspanningskabels bepalen wat de bijdragen van de kabels is aan de drinkwatertemperatuur. Er zijn tabellen en grafieken opgesteld die een overzicht bieden van de gevoeligheid voor deze factoren op stedelijke schaal. De percentages van het leidingnet met de hoogste watertemperatuurverhogingen bevinden zich meestal op de locaties waar hoger belaste kabels samenvallen met de uiteinden van het leidingnet en slechts sporadisch op doorgaande leidingen. Bovengrondse factoren zoals maaiveldbedekking, schaduw en seizoen hebben weliswaar een duidelijke invloed op de absolute temperaturen in de bodem, maar hebben geen of minimaal effect op de beïnvloeding van de drinkwatertemperatuur door kabels: bij hoge of bij lage achtergrondtemperatuur blijft de bijdrage van de kabels vergelijkbaar.

De bodemtemperatuur rond leidingen en de resulterende drinkwatertemperatuur zijn een gevolg van veel verschillende factoren. Ten opzichte van de overige factoren in de omgeving van de leiding en de voorheen onderzochte invloed van warmtenetten blijkt de bijdrage van elektriciteitskabels relatief beperkt. Wat dat betreft is de verwachting dat het mogelijk moet zijn voor netbeheerders en drinkwaterbedrijven om te komen tot overeenstemming over een gewenste minimale afstand tussen kabels en leidingen. Wel wordt aanbevolen om bij dergelijke afspraken expliciet aandacht te besteden aan langetermijnontwikkelingen in de belasting van het elektriciteitsnet en om expliciete aandacht te besteden aan het verschil tussen nieuwbouw en reconstructies van bestaande situaties. Ook wordt aanbevolen om de situaties die in de uiteindelijke afspraken worden overwogen nog eens gedetailleerd door te rekenen met de methodieken en inzichten uit dit onderzoek.

Inhoud

Samenvatting	4
Inhoud	5
1 Inleiding	8
1.1 Achtergrond	8
1.2 Doel	8
1.3 Aanpak en leeswijzer	8
2 Aanpak en uitgangspunten	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Uitgangspunten bij de brede verzameling van lokale liggingsscenario's	10
2.2.1 Aangenomen kabelinfrastructuurklassen	10
2.2.2 Aangenomen thermische uitstraling van kabels	11
2.2.3 Aangenomen thermische geleidbaarheid van de bodem	12
2.2.4 Aangenomen microklimaatparameters	13
2.2.5 Overwogen afstanden tussen leidingen en kabels	13
2.2.6 Aangenomen leidingneteigenschappen	14
2.3 Keuze voor maatgevende varianten op basis van de doorgerekende verzameling lokale scenario's	14
2.3.1 Observaties uit tussenresultaten	14
2.3.2 Maatgevende scenario's	15
2.4 Uitgangspunten bij de stadsbrede scenario's	17
2.4.1 Kansen op combinaties van infrastructuur	17
2.4.2 Scenario's qua kabelredundantie	17
2.4.3 Genereren en doorrekenen van stadsbrede scenario's	18
2.4.4 Leidingnet en leidingeigenschappen	18
2.4.5 Gevoeligheidsstudie	19
2.4.6 Vertaling van de berekeningen naar uitkomsten	19
3 Analyse van de lokale thermische invloed van vijf kabelinfrastructuurklassen op de drinkwatertemperatuur	21
3.1 Inleiding	21
3.2 Gekoppeld microklimaat- en bodemtemperatuurmodel (BTM+)	21
3.2.1 Microklimaatmodel	22
3.2.2 Bodemmodel	22
3.3 Het modeleren van de warmteverliezen van kabels	24
3.3.1 Afschatten van kabelbelasting	24
3.3.2 Belastingsfactoren	25
3.3.3 Modeleren van kabels in het BTM+	26
3.4 Invoerdata en scenario's	26
3.4.1 Klimaatdata	26

3.4.2	Kabelbelasting	26
3.4.3	Geometrie en draadmodel	26
3.4.4	Scenario's voor boven- en ondergrondse omstandigheden	28
3.4.5	Algemene invoerdata	29
3.5	Resultaten	29
3.5.1	Opstarttijd in de modelering	29
3.5.2	Referentiemodel zonder elektriciteitskabels	30
3.5.3	Invloed van kabels onder lage belasting	31
3.5.4	Invloed van kabels onder hoge belasting	35
3.6	Discussie	36

4 Vergelijking tussen veldmetingen en modelberekeningen aan lokale thermische beïnvloeding op een specifieke locatie 37

4.1	Inleiding	37
4.2	Metingen op de casestudielocatie	37
4.2.1	Casestudielocatie	37
4.2.2	Apparatuur en opstelling	38
4.2.3	Verkrege meetdata	39
4.3	Model van de casestudielocatie	40
4.3.1	Geometrie	40
4.3.2	Weergegevens	40
4.3.3	Bodemeigenschappen	41
4.3.4	Thermische verliezen van de kabels	41
4.3.5	Watertemperatuur in het model	42
4.4	Vergelijking tussen metingen en model	42

5 Stadsbrede analyse van de invloed van kabels op de drinkwatertemperatuur 45

5.1	Inleiding	45
5.2	Modelaanpak	45
5.2.1	Algemene beschrijving van WTM+	45
5.2.2	WTM+ workflow en de structuur van een stadsbrede berekening	46
5.2.3	Hydraulisch model	46
5.2.4	Kabeldichtheid	48
5.2.5	Omgevingstemperatuur	48
5.2.6	Modelconstanten	48
5.2.7	Nabewerking van de WTM+ uitkomsten	49
5.3	Overwogen scenarios	49
5.3.1	Utiliteitsfactorenscenarios	49
5.3.2	Kabeldichtheidscenarios	50
5.4	Uitkomsten	50
5.4.1	Referentiescenario	50
5.4.2	Invloed van kabels op de drinkwatertemperatuur	51
5.4.3	De invloed van kabeldichtheid	52
5.4.4	Analyse van lokale temperatuurverhogingen in Almere	55
5.5	Discussie	60

6	Conclusies en aanbevelingen	63
6.1	Conclusies	63
6.2	Aanbevelingen	64
6.2.1	Aanbevelingen voor toepassing	64
6.2.2	Ruimte voor aanscherping	64
I.	Inventarisatie van toekomstige kabelinfrastructuurklassen	66
II.	GIS-analyse van kabeldichtheden in Almere en Rijnmond	68
III.	Tijdreeksen van de gebruikte klimaatdata in de modelstudie	71
IV.	Berekende warmteverliezen per kabel	73

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Drinkwaterwet vereist dat de temperatuur van drinkwater aan de tap niet hoger is dan 25°C. Een hogere temperatuur is nadelig voor de kwaliteit van het drinkwater. Opwarming kan plaatsvinden door bovengrondse warmtebronnen, inclusief (warme) weersomstandigheden, maar ook door aanwezigheid van warmtebronnen in de ondergrond. De komende jaren zal een verdergaande elektrificatie van diverse sectoren plaatsvinden. Netbeheerders elektra leggen momenteel veel nieuwe kabels aan en hebben ambities om de komende jaren het aanlegtempo te verhogen. Daarbij komt de vraag op of hierdoor de totale warmteafgifte naar de omgeving toeneemt, en wat dat voor consequenties kan hebben voor de drinkwatertemperatuur.

Deze ontwikkelingen maken het belangrijk om de impact van elektriciteitskabels op de drinkwatertemperatuur beter te onderzoeken. Het TKI-project ENGINE werd tussen 2020 en 2023 uitgevoerd om inzicht te krijgen in de invloed van warmtenetten op de drinkwatertemperatuur [van Esch, 2022; Blokker en Pan, 2022]. Dit onderzoek vormde de basis voor de overeenkomst die Energie Nederland en Vewin op 24 juli 2024 tekenden, waarin afspraken zijn vastgelegd over de afstand tussen ondergrondse warmtenetten en drinkwaterleidingen. Op vergelijkbare wijze willen Netbeheer Nederland en Vewin gezamenlijk verkennen wat de mogelijke impact is van verdergaande elektrificatie op de drinkwatertemperatuur, en gezamenlijk werken aan een handelingsperspectief.

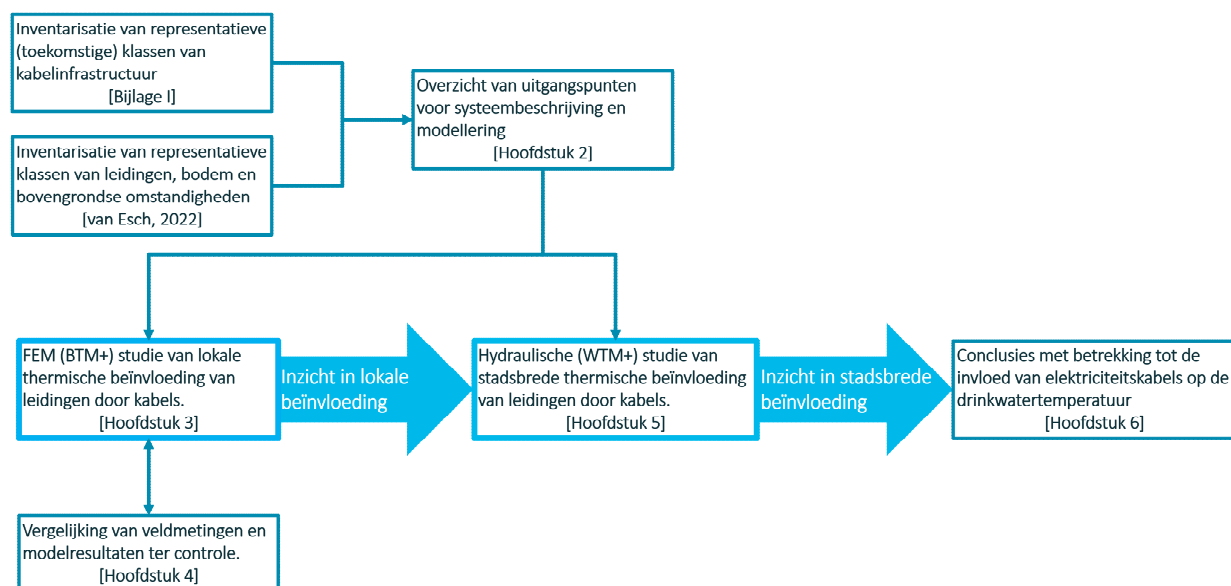
1.2 Doel

Het voorliggende rapport beschrijft modelmatig onderzoek dat tot doel heeft inzicht te bieden in de bijdrage van elektriciteitskabels aan de toename van de drinkwatertemperatuur in het leidingnet. Het verkregen inzicht heeft als doel om inhoudelijk houvast te bieden tijdens het opstellen van sectorafspraken tussen drinkwaterbedrijven en netbeheerders over voorkeursafstanden tussen kabels en leidingen.

1.3 Aanpak en leeswijzer

Figuur 1 geeft schematisch de hoofdelementen van het onderzoek weer en geeft aan waar die elementen binnen deze rapportage zijn beschreven. In deze studie is gewerkt met een getrapt model. Eerst is voor een representatieve verzameling van lokale liggingssituaties uitgezocht wat daar de thermische beïnvloeding is. Het inzicht in die lokale beïnvloeding is vervolgens vertaald naar de context van een stadsbreed gebied dat is opgebouwd uit (een combinatie van) dergelijke lokale situaties om uit te zoeken wat de thermische beïnvloeding is op stadsbreed niveau. Deze overkoepelende aanpak is in meer detail beschreven in Hoofdstuk 2, waarin ook veel aandacht wordt besteed aan de uitgangspunten die worden gebruikt om te komen tot een representatieve beschrijving en verkenning van de beïnvloeding van de drinkwatertemperatuur door kabels. Die uitgangspunten worden in het bijzonder gevoed door een inventarisatie van relevante toekomstige liggingssituaties door de netbeheerders, opgenomen in Bijlage I, en door de overdraagbare uitgangspunten uit het onderzoek naar de invloed van warmtenetten, beschreven in [van Esch, 2023]. De technische analyse van de thermische beïnvloeding op lokale schaal is beschreven in Hoofdstuk 3. Ter controle van die modelaanpak zijn veldmetingen aan een liggingssituatie in Poederloijen vergeleken met de uitkomsten van een modelmatige reproductie van die situatie. Dit

is beschreven in Hoofdstuk 4. De analyse van thermische beïnvloeding op gebiedsschaal is beschreven in Hoofdstuk 5. De conclusies en aanbevelingen die volgen uit het onderzoek zijn opgenomen in Hoofdstuk 6.



Figuur 1. Overkoepelende aanpak van het onderzoek en leeswijzer voor dit rapport.

2 Aanpak en uitgangspunten

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de overkoepelende modelaanpak, uitgangspunten en scenario's die ten grondslag liggen aan het Engine-E onderzoek. De aanpak volgt op hoofdlijnen de volgende stappen:

- **Opzet van een brede verzameling lokale scenario's** – Paragraaf 2.2 – Er is een verzameling van dwarsprofielen met kabels en drinkwaterleidingen opgesteld. Binnen de verzameling worden varianten opgenomen met verschillende typen infrastructuur, verschillende bodemomstandigheden en verschillende bovengrondse omstandigheden. De varianten zijn gekozen om een representatieve verzameling op te spannen van denkbare situaties waar drinkwater in de toekomst doorheen zou kunnen stromen.
- **Keuze voor maatgevende varianten op basis van de doorgerekende verzameling lokale scenario's** – Paragraaf 2.3 – De totale set van lokale scenario's is doorgerekend met behulp van het bodemtemperatuurmodel (BTM+). Deze analyse is in detail beschreven in Hoofdstuk 3. Aan de hand van de uitkomsten is een beperkte set maatgevende lokale scenario's gekozen die samen de verschillende klassen van thermische beïnvloeding van drinkwater door kabels goed samenvatten.
- **Opbouw van stadsbrede scenario's uit de maatgevende lokale liggingsscenario's** – Paragraaf 2.4 – Uit de maatgevende lokale scenario's worden "steden" opgebouwd, waarbinnen verschillende leidingen parallel komen te liggen aan verschillende lokale scenario's. Met het watertemperatuurmodel (WTM+) is berekend hoe de temperatuur van het drinkwater zich ontwikkelt wanneer het door een dergelijk stadsbreed scenario stroomt. Deze analyse is in detail beschreven in Hoofdstuk 5. Op die manier wordt recht gedaan aan het feit dat stromend water slechts tijdelijk wordt blootgesteld aan ieder lokaal scenario en dus ook maar tijdelijk door dat scenario wordt beïnvloed.

Dit hoofdstuk beperkt zich tot een beschrijving van de aannames en beschrijft tussenresultaten van analyses kort daar waar die de verdere aannames informeren. De volledige beschrijving van de analyses en uitkomsten zijn opgenomen Hoofdstukken 3 en 5.

2.2 Uitgangspunten bij de brede verzameling van lokale liggingsscenario's

2.2.1 Aangenomen kabelinfrastructuurklassen

Centraal staan een vijftal kabelinfrastructuurklassen (KIK). Deze zijn gekozen en beschreven door de netbeheerders op basis van expertkennis. Deze KIK worden als representatief beschouwd voor nieuw aan te leggen situaties in het elektriciteitsnet. Het wordt benadrukt dat op het moment van schrijven ook veel andere liggingssituaties aanwezig zijn in het elektriciteitsnet, en dat het complex kan blijken om deze bestaande situaties om te vormen naar een van deze KIK bij reconstructie of renovatie. Aan iedere KIK zijn voorbeelden van bestaande, recent aangelegde situaties verbonden. De KIK onderscheiden zich door het aantal aanwezige laag- en middenspanningskabels en door de aanwezigheid van wel of geen sleufvulling met toegespitste thermische eigenschappen. De gedetailleerde beschrijving vanuit de netbeheerders is opgenomen in Bijlage I. Kortweg kunnen de vijf KIK en een referentiesituatie als volgt worden beschreven:

- KIK0 – geen kabels in de buurt van de waterleiding – de referentiesituatie.
- KIK1 – twee laagspanningskabels (4x150 mm²) of één laagspanningskabel (150 mm²) en één (lichte) middenspanningskabel (3x150 mm²) – representatief voor een veelvoorkomende situatie in een woonwijk; de

tweede optie is de configuratie waarin de grootste lengte van het middenspanningsnet verkeert (zie ook Appendix II).

- KIK2 – vier laagspanningskabels (4x150 mm²) en twee middenspanningsdistributiekabels (3x240 mm²) – representatief voor een (uitzonderlijk) zwaarder uitgevoerd deel van het middenspanningsnet in een woonwijk.
- KIK3 – één laagspanningskabel (4x150 mm²), drie middenspanningskabels (3x240 mm²) en twee grotere middenspanningskabels (3x630 mm²) – representatief voor een hoofdroute langs een grote weg waarlangs elektra een woonwijk in wordt gebracht.
- KIK4 – vier laagspanningskabels (4x150 mm²) en zeven middenspanningstransportkabels (3x630 mm²) – representatief voor een industrieterrein met substantiële toevoer van elektriciteit.
- KIK5 – vier laagspanningskabels (4x150 mm²) en elf middenspanningstransportkabels (3x630 mm² en 3x800 mm²) – representatief voor de situatie nabij een transformatorstation. De Netbeheerders hebben ook een variant van dit scenario beschreven waarin een EPS-plaat is aangebracht als maatregel tegen thermische beïnvloeding (casus 6 in Bijlage I). Het paste niet in deze studie om deze variant met voldoende aandacht door te rekenen.

2.2.2 Aangenomen thermische uitstraling van kabels

Een aspect dat de thermische beïnvloeding van drinkwater door kabels sterk bepaalt (zie ook Paragraaf 2.3), is de thermische uitstraling ten gevolge van de belasting van de kabels. De thermische uitstraling is per KIK voor iedere afzonderlijke kabel bepaald met een toegespitste berekening die rekening houdt met de onderlinge beïnvloeding van de kabels. Deze berekeningen zijn beschreven in Paragraaf 3.3. Bij die berekening stonden de volgende denkstappen en aannamen over de belasting van de kabels centraal:

- Het dagpatroon wordt geaggregeerd tot een gemiddelde, continue belasting. Dat is een **gepaste aanname** omdat de temperatuurschommelingen in de kabels die het gevolg zijn van het dagpatroon snel uitdempen in het temperatuurprofiel van de bodem (de veldmetingen in Hoofdstuk 4 bevestigen dit).
- Een belangrijk houvast om de toekomstige belasting van een kabelcircuit in te kunnen schatten is de maximaal toelaatbare belasting van de kabels. Deze wordt berekend volgens standaard IEC 60287. Dit technisch maximum hangt samen met de temperaturen die de kabels maximaal mogen bereiken zonder dat hun technische levensduur substantieel wordt verkort.
- Kabels worden structureel minder belast dan het technisch maximum. Om te komen tot een representatieve gemiddelde, continue belasting nemen we de technisch maximaal toelaatbare belasting en vermenigvuldigen we deze met de volgende belastingsfactoren:
 - 1 Een **patroonfactor** van 0,5 om uit te komen tot de gemiddelde thermische uitstraling die hoort bij het dagpatroon (de maximale belasting in het patroon heerst slechts enkele kwartieren per dag).
 - 2 Een **redundantiefactor** van 0,5 (laagspanning¹) of een factor 0,66 (middenspanning) om recht te doen aan de redundantie die in kabels wordt ingebouwd om kabelstoringen op te vangen. Lussen worden in een onverstoorde situatie maar gedeeltelijk belast, zodat het mogelijk is om tijdens onderbreking van de lus door een storing via één uiteinde te kunnen blijven leveren met verhoogde belasting terwijl de reparaties plaatsvinden. Storingen zijn zeldzaam en reparaties zijn ruim binnen 24 uur voltooid [Kaptein, 2026]. Deze redundandiefactor is dus structureel van toepassing en de mogelijke invloed van tijdelijk hogere belasting tijdens storingen op de drinkwatertemperatuur wordt in deze studie verwaarloosd.
 - 3 Een **utilisatiefactor** van 0,5, omdat een nieuwe lus zo wordt aangelegd dat deze in de vraag voorziet van slechts de helft van het aantal huizen dat een exact redundante lus aan zou kunnen. In de loop van de tijd kan de vraag op de lus nog groeien en deze factor deels tenietdoen (zie ook Kader 1 op pagina 15).

¹ Deze factor gaat uit van een oude manier van aanleggen van redundant aanleggen van het laagspanningsnet, namelijk in lussen onderbroken door een netopening (vergelijkbaar met Figuur 3 voor middenspanning). In modernere structuren wordt er ook gewerkt met stervormige laagspanningsnetten zonder redundantie, maar dan wordt de belasting door de aansluitingen verdeeld over de drie fasen binnen een kabel, waardoor de factor nog lager uitvalt.

- Aan de hand van deze resulterende gemiddelde, continue belasting wordt de thermische uitstraling van alle kabels bepaald. Dat deze belasting voor alle kabelsegmenten van toepassing is, is een **conservatieve vereenvoudiging**. In werkelijkheid is dit de belasting die van toepassing is op de kabelsegmenten aan de uiteinden van een lus, waar de stroom voor alle achtergelegen huizen doorheen stroomt. De belasting van segmenten in het midden van de lus is doorgaans veel lager (behalve in de tijdelijke situaties bij een storing waarbij de lus vanuit één kant gevoed wordt).

Samenvattend: In de totale set van scenarioberekeningen wordt voor laagspanning gerekend met een continue belasting van 12,5% van het technische maximum ($0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,125$) en voor middenspanning wordt gerekend met een continue belasting van 16,5% van het technisch maximum ($0,66 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 0,165$). Voor de precieze belastingswaarden en thermische uitstraling per kabelinfrastructuurklasse wordt verwezen naar Paragraaf 3.3 en Bijlage IV.

In het bovenstaande verdient de utilisatiefactor enkele aanvullende overwegingen. Deze factor representeert een capaciteitsoverschot aanwezig in nieuw-aangelegde situaties. Vanaf de nieuwe aanleg zal het in de toekomst voor tenminste sommige lussen voor kunnen komen dat deze structureel hoger belast worden (door het aansluiten van meer gebruikers of een verhoging van de belasting door bestaande gebruikers). In de totale set van scenarioberekeningen zijn daarom aanvullende 'hotspot' varianten opgenomen met de thermische uitstraling die optreedt als de utilisatiefactor niet wordt doorgevoerd. Er wordt dan voor laagspanning gerekend met een continue belasting van 25% van het technische maximum ($0,5 \cdot 0,5 = 0,25$) en voor middenspanning wordt er dan gerekend met een continue belasting van 33% van het technisch maximum ($0,66 \cdot 0,5 = 0,33$). Voor de precieze berekening van belastingswaarden per kabelinfrastructuurklasse wordt verwezen naar Paragraaf 3.3. Kader 1 op pagina 15 geeft wat meer kleuring bij het vertalen van netbeheer naar deze belastingsfactoren.

Tenslotte wordt opgemerkt dat in deze analyse geen seizoensafhankelijk elektriciteitsverbruik wordt aangenomen. Over het algemeen mag een hoger elektriciteitsverbruik verwacht worden in de koudere perioden. In die perioden zijn er ook minder risico's gemoeid met de thermische beïnvloeding van het drinkwater, omdat de basistemperatuur dan ook lager ligt door een koudere bodem. Bij die aanname gaan we uit van eenzelfde uitgangspunt als dat ten grondslag lag aan de sectorafspraken rond warmtenetten waarin de focus lag op de thermische beïnvloeding aan het eind van de zomer (warmste bodemtemperaturen). Het wordt daarom niet nodig geacht om een nadere analyse met hogere of lagere elektriciteitsvraag in respectievelijk de winter en de herfst op te zetten.

2.2.3 Aangenomen thermische geleidbaarheid van de bodem

Een tweede aspect dat substantiële impact heeft op de thermische beïnvloeding van drinkwater door kabels is de thermische geleidbaarheid, λ , van de bodem. Deze waarde hangt af van het bodemtype en het vochtgehalte van de bodem, wat sterk situatie- en/of seizoensafhankelijk kan zijn. In de totale set van scenarioberekeningen zijn daarom varianten met de volgende waarden voor thermische geleidbaarheid van de bodem opgenomen:

- $0,4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, indicatief voor zand dat is uitgedroogd, bijvoorbeeld onder invloed van aanhoudende opwarming door kabels.
- $1,0 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, indicatief voor regulier droog/licht vochtig zand. Dit is de waarde waarmee typisch gerekend wordt in de normen van de energiesector.
- $1,25 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, indicatief voor sleufvulling met thermische eigenschappen die erop toegespitst zijn om warmte rond de kabels beter af te voeren.
- $1,6 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$, indicatief voor nat zand. Dit is de waarde waarmee gerekend is in het originele project TKI-Engine rond de thermische invloed van warmtenetten op drinkwater [van Esch, 2022]. Hierbij is het belangrijk om op te merken dat de belasting van de kabels niet wordt aangepast op deze variant in geleidbaarheid (als de hogere geleidbaarheid van de bodem bij het ontwerp van kabels wordt geanticipeerd, kan bij dat ontwerp uitgegaan worden van een hogere belasting van de kabels omdat kabels hun warmte makkelijker kwijt kunnen).

Deze variant kan uitgelegd worden als het tijdelijk nat worden van de bodem, waarbij de bestaande infrastructuur verder niet wordt aangepast.

In KIK1 en KIK2 liggen de kabels in regulier zand met een waarde van $1,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Bij KIK3 is de kabelinfrastructuur dusdanig zwaar dat volgens sector-experts verwacht wordt dat er rekening gehouden moet worden met uitdroging onder invloed van hogere temperaturen, zodat de λ in het model dynamisch (discontinu) wisselt tussen $1,0 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ en $0,4 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ afhankelijk van de bodemtemperatuur. Voor KIK4 en KIK5 geldt dat de kabels in de toegespitste sleufvulling met $\lambda = 1,25 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ liggen, waarvoor wordt aangenomen dat uitdroging niet optreedt. Daarnaast is in alle KIK het zand met $\lambda = 1,0 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ een keer vervangen door nat zand met $\lambda = 1,6 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ ter referentie. Los van deze varianten wordt aangenomen dat de thermische eigenschappen van de bodem homogeen zijn en constant zijn in de tijd.

2.2.4 Aangenomen microklimaatparameters

Met het microklimaat wordt bedoeld de bovengrondse omstandigheden die bepalen hoeveel warmte er wordt uitgewisseld tussen boven- en ondergrond. Ook als er geen kabels aanwezig zijn, wordt drinkwater beïnvloed door deze bovengrondse omstandigheden. In de totale set van scenarioberekeningen zijn varianten van bovengrondse situaties opgenomen door verschillende waarden toe te kennen aan een aantal parameters die een rol spelen in het microklimaatmodel. Deze aanpak komt overeen met de studie die eerder is uitgevoerd om de thermisch beïnvloeding van warmtenetten te bepalen [van Esch, 2022].

De variaties die worden meegenomen:

- **Een maaiveldoppervlak van gras, tegels of tegels in schaduw.** Gras wordt gerepresenteerd met een albedofactor (reflectie zonlicht) $\alpha = 0,19$, een maximale laagdikte voor wateropslag $S_{max} = 1 \text{ mm}$, warmte-opslagcoëfficiënten $a_1 = 1 \text{ [-]}$ en $a_3 = -10 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}]$ en evapo-transpiratie. Tegels wordt gerepresenteerd met een albedofactor $\alpha = 0,12$, een maximale laagdikte voor wateropslag $S_{max} = 0,48 \text{ mm}$, warmte-opslagcoëfficiënten $a_1 = 0,8 \text{ [-]}$ en $a_3 = -100 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}]$ en geen evapo-transpiratie. Bij Tegels in schaduw wordt de albedofactor omgezet naar $\alpha = 1$.
- **Een droge, vochtige of natte bodem.** Een droge bodem wordt gerepresenteerd met een warmtecapaciteit $C_{p,bodem} = 800 \text{ [J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, een dichtheid $\rho_{bodem} = 1600 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ en een thermische geleidbaarheid van $\lambda = 1 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$. Een vochtige bodem wordt gerepresenteerd met een warmtecapaciteit $C_{p,bodem} = 1000 \text{ [J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ en een dichtheid $\rho_{bodem} = 1700 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ en een thermische geleidbaarheid van $\lambda = 1 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$. Een natte bodem wordt gerepresenteerd met een warmtecapaciteit $C_{p,bodem} = 1000 \text{ [J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$, een dichtheid $\rho_{bodem} = 1700 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}]$ en een thermische geleidbaarheid van $\lambda = 1,6 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$.
- **Een variatie aan weersomstandigheden** wordt meegenomen door iedere scenariovariant uit te rekenen aan de hand van 12 maanden aan KNMI-data (temperatuur, neerslag, windsnelheid, luchtvochtigheid). Het betreft data van 3 juni 2019 t/m 3 juni 2020. Dit jaar bevat onder andere de warmste hittegolf van de afgelopen tien jaar. Uiteindelijk blijkt de invloed van de weersomstandigheden op de impact van kabels beperkt is (zie Paragraaf 3.5.3), zodat het niet nodig is gebleken om artificiële varianten met extra opwarming door klimaat op te stellen.

2.2.5 Overwogen afstanden tussen leidingen en kabels

Er worden voor ieder scenario een aantal varianten overwogen voor verschillende afstanden tussen kabels en leiding. Zo ontstaat het inzicht in de thermische beïnvloeding als functie van de afstand tussen kabels en leidingen die in dat scenario met kabels verwacht mag worden. Er is gerekend met de volgende dagmaten (horizontale afstanden van zij tot zij) tussen de leiding en de dichtstbijzijnde kabel in het kabelbed: 0 m, 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, of 3 m. 0,5 m komt daarbij overeen met de afstand die door de werkgroep van medewerkers van drinkwaterbedrijven en netbeheerders werd aangegeven als ondergrens voor een realistische afstand in verband met aspecten zoals praktisch en veilig werken in de sleuf en sleufstabiliteit; 0 m is opgenomen om voorbij die grens ook inzicht op te bouwen; 3 m is gekozen als een ruime afstand vanaf waarover nog maar weinig thermische beïnvloeding verwacht wordt. In de uitgangssituatie wordt ook gerekend met een verticale afstand: de leiding ligt wat dieper dan de kabels. Bij een horizontale dagmaat van 0 m ligt de leiding nog 30 cm lager dan de kabel.

2.2.6 Aangenomen leidingeigenschappen

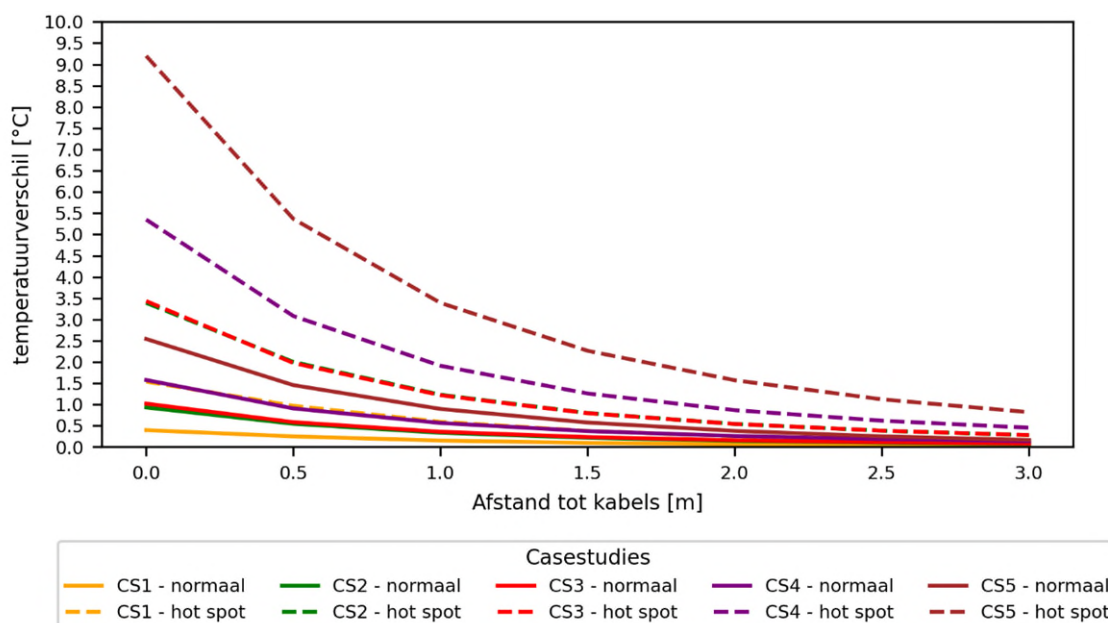
Bij het doorrekenen van de lokale scenario's doen de leidingeigenschappen minder ter zake, omdat het hier berekeningen aan de stabiele toestand (*steady state*) betreft. In dat soort berekeningen wordt alleen de eindtemperatuur bepaald die het water in een bepaalde situatie zal bereiken als deze situatie langdurig aanhoudt, en deze eindtemperatuur hangt maar beperkt af van bijvoorbeeld het leidingmateriaal, de diameter of de begintemperatuur van het water. De verdere toelichting op het doorrekenen van de lokale scenario's volgt in Paragraaf 2.3.

Bij het doorrekenen van de stadsbrede scenario's spelen deze eigenschappen wel een belangrijke rol, omdat het daar gaat om een dynamische (*transient*) analyse. In die berekeningen stroomt het water opvolgend door verschillende leidingen met verschillende eigenschappen (en wordt het blootgesteld aan verschillende KIK), en die eigenschappen bepalen mede hoeveel de watertemperatuur daarbij per segment in het traject verandert. De eigenschappen van de leidingen, het leidingnet en de waterstroom worden verder toegelicht binnen de beschrijving van de stadsbrede analyse in Paragraaf 2.4.4.

2.3 Keuze voor maatgevende varianten op basis van de doorgerekende verzameling lokale scenario's

2.3.1 Observaties uit tussenresultaten

De tussenresultaten uit de lokale analyse worden kort besproken als achtergrond bij de opbouw van de stadsbrede analyse. De totale set van lokale scenario's is doorgerekend met behulp van het bodemtemperatuurmodel (BTM+). Een gedetailleerde beschrijving van het model, de aanpak en de resultaten is beschreven in Hoofdstuk 3. De samenvatting van de uitkomsten is opgenomen in Figuur 2. Een curve in de figuur is steeds geconstrueerd uit de uitkomsten van twee scenario's: een scenario met een bepaald aantal kabels (KIK1 t/m KIK5 en de hotspot varianten) en hetzelfde scenario maar dan zonder kabels (KIK0, de referentie, de nullijn van de grafiek). De curve geeft het verschil tussen die twee scenario's van de temperaturen van het drinkwater (midden van de buis) terwijl de leiding op een bepaalde dagmaat ligt. Zo ontstaat het inzicht in de thermische beïnvloeding als functie van de afstand tussen kabels en leidingen die in dat scenario met kabels verwacht mag worden.



Figuur 2. Thermische beïnvloeding van de drinkwatertemperatuur door kabels in verschillende scenario's. Vergelijking van de lokale thermische beïnvloeding van drinkwater door KIK1 t/m KIK5 en de hotspot varianten van KIK1 t/m KIK5 ten opzichte van KIK 0. In de figuur wordt KIK met CS aangeduid. Het microklimaatsscenario voor deze curves is: tegels, droog zand, gemiddelde bebouwing (TMDz).

De belasting van de kabels is, zoals verwacht, allesbepalend. Alleen de scenario's met KIK5 en de 'hotspot-scenario's' zonder de utilisatiefactor in de belasting van de kabels leiden tot een thermische beïnvloeding van meer dan 1 °C op korte afstanden. Andere uitkomsten in Hoofdstuk 3 (Figuur 14) laten zien dat de overige scenarioparameters (maaiveldbedekking, bebouwing, etc.) minder effect hebben. Wel is de thermische beïnvloeding wat hoger bij een thermische geleidbaarheid van de bodem van 1,0 [W·m⁻¹·K⁻¹] dan bij 1,6 [W·m⁻¹·K⁻¹].

2.3.2 Maatgevende scenario's

De volgende aspecten van "maatgevende" lokale scenario's zijn gekozen om te gebruiken bij het construeren van de stadsbrede scenario's:

- KIK4 en KIK1 (zie Paragraaf 2.2.1) met de volledige belastingsfactor (12,5% en 16,5%) qua thermische uitstraling doorgevoerd (zie Paragraaf 2.2.2). Deze twee opties zijn indicatief voor wel of geen zware middenspanningskabels aanwezig.
 - KIK1 komt daarbij overeen met casus 1b in Bijlage I. Eigenlijk is de thermische uitstraling voor casus 1a wat hoger dan voor 1b. De keuze voor 1b is een compromis tussen de 70% leidingen die enkel naast laagspanning (casus 1b) ligt en de 20% leidingen die naast de laagste klasse van middenspanning ligt (casus 1a).
 - KIK4 is gekozen als de conservatieve benadering van zware middenspanningskabels, representatief voor KIK2 t/m KIK4.
- Een thermische geleiding van de bodem van 1,0 [W·m⁻¹·K⁻¹] (droog zand), de waarde waarmee netbeheerders volgens hun eigen normen typisch rekenen en qua opwarmingsrisico de conservatieve optie ten opzichte van vochtiger zand met een waarde van 1,6 [W·m⁻¹·K⁻¹] (zie Paragraaf 2.3.1).
- Een gemiddelde mate van bebouwing, droog zand, en een maaiveldbedekking van tegels. Dit zijn conservatief gekozen varianten, maar over het algemeen hebben deze keuzes ieder een minimaal effect op de thermische beïnvloeding van kabels (zie Paragraaf 2.3.1 en Figuur 15 in Hoofdstuk 3).

Bovenstaande drie punten geven goede uitgangspunten om de basis van een stadsbreed scenario uit op te bouwen. Iedere drinkwaterleiding in de "stad" komt in beginsel naast ofwel KIK1 ofwel KIK4 te liggen. Daarnaast wordt rekening gehouden met het (in de toekomst) optreden van lokale hotspots:

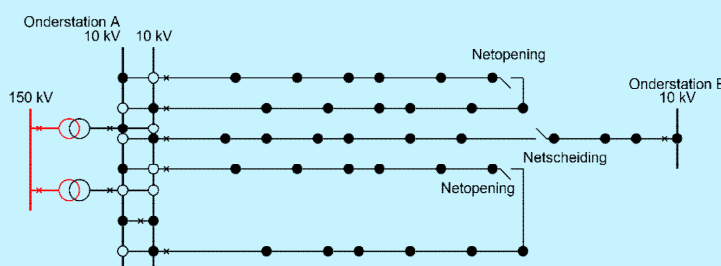
- KIK5 met de volledige correctiefactor qua thermische uitstraling (16,5%, zie Paragraaf 2.2.2). Deze is indicatief voor de beperkt voorkomende, zeer lokale situatie van een transformatiestation in de stad, waar veel middenspanningskabels vertrekken, ingebed in sleufvulling met toegespitste thermische eigenschappen.
- KIK1 en KIK4 zonder de utilisatiefactor qua thermische uitstraling doorgevoerd (de factor die het capaciteitsoverschot in nieuw aangelegde kabels representeert, we komen uit op 25% en 33%, zie Paragraaf 2.2.2).

Deze verhoogde belasting zal in meer of mindere mate voorkomen in een stad. Dit is afhankelijk van de aanleggeschiedenis, de toekomstige manier van aanleggen en de ontwikkeling van de vraag per lus in het elektriciteitsnet. In Kader 1 wordt nader beschreven binnen welke grenzen de vraag en belasting op een streng van middenspanningskabels zich kunnen ontwikkelen en hoe al te hoge belasting wordt voorkomen door kabels op tijd te vervangen. Het door de utiliteitsfactor vertegenwoordigde capaciteitsoverschot wordt (op dit moment) standaard aangelegd en is dus bij het begin van de levenscyclus van de kabel van toepassing. Wanneer het verbruik op de kabel vervolgens gedurende de levenscyclus toeneemt, zou dat gerepresenteerd worden door een afname in die utiliteitsfactor (een gedeelte van de buffer wordt opgenomen). Het resultaat van die ontwikkeling zou naar verwachting leiden tot een beperkt aantal "hotspots" die worden "rondgestrooid" in de stad. Dit soort mogelijke situaties kunnen in de vorm van afzonderlijke stadsbrede scenario's met elkaar worden vergeleken.

Kader 1. Beheer van de belasting op middenspanningskabels.

Het gebruikelijke ontwerp van middenspanningskabels is in detail beschreven in openbare bronnen zoals [Kaptijn, 2026] en [Phase to Phase, 2026, hoofdstuk 2] en komt ook terug in interne middenspanning ontwerp-kaders (voor Enexis bijvoorbeeld in ECA-0314.k "Configuratie MS-T netten en verdeelstations" en ECA-0302.k "Configuratie MS-D netten en MS-D netstations").

Middenspanningskabels worden tegenwoordig aangelegd als onderbroken lussen: doodlopende strengen waarvan de uiteinden verbonden kunnen worden door een netopening te sluiten (Figuur 3). Deze structuur bestaat om – wanneer de streng wordt onderbroken door een storing – de aansluitingen op een streng via een andere route van stroom te kunnen voorzien door een netopening te sluiten.



Figuur 3. Modern ontwerp van een middenspanningsdistributienet (zwart). Vanuit een door hoogspanning (rood) gevoede hoofdstructuur lopen ringen langs een aantal transformatorstations die het laagspanningsnet verbinden (stippen). De ringen zijn tijdens normaal bedrijf onderbroken door netopeningen die kunnen worden gesloten om een alternatieve aanvoeroute van stroom te geven in geval van storing. Overgenomen uit [Phase to phase, 2026]

In regulier bedrijf staan de netopeningen open en wordt een streng vanuit één kant gevoed. De belasting wordt dan bepaald door het aantal aansluitingen op de streng en hun verbruik. De belasting (en dus de thermische uitstraling) is daarmee maximaal aan het begin van de streng en is 0 ter hoogte van de netopening. Bij het toewijzen van aansluitingen aan een streng wordt er zorg voor gedragen dat de belasting aan het begin van de streng zelfs op een piekmoment niet te dicht in de buurt komt van de technisch acceptabele maximale belasting. Iedere netbeheerder hanteert daarin eigen bedrijfsrichtlijnen. Een voorbeeld van een bedrijfsrichtlijn is 65% van het technisch maximum op het piekmoment (hoogste verbruik tijdens enkele kwartieren per jaar) waarbij rekening gehouden wordt met prognoses voor groei in gebruik voor de komende 15 jaar [Enexis, 2026]. Zou op het piekmoment 15 jaar vooruit ook een storing optreden, dan zou een netopening gesloten worden en zou over het begin van de lus kortstondig een belasting van 130% van het technische maximum gelden. Dat wordt als een acceptabel risico beschouwd. De redundantiefactor van 0.66 in Paragraaf 2.2.2 sluit aan op dit proces.

Wanneer de aansluitingen op een streng zoveel verbruiken dat de belasting aan het begin van de streng de 65% van het technisch maximum op het geprognoseerde piekmoment benadert, wordt er geen uitbreiding van de aansluitingen op de streng meer geaccepteerd. De netbeheerder kan dan “congestie afkondigen”, en nieuwe aansluitingen zijn pas mogelijk na een renovatie waarbij er extra kabels zijn aangelegd. Bij een dergelijke renovatie wordt de betreffende middenspanningslus opgedeeld in twee nieuwe lussen, waarbij het uitgangspunt is dat het verbruik op de originele lus evenredig over de twee lussen wordt verdeeld [Enexis, 2026]. Na de renovatie benadert de belasting aan het begin van de originele streng dus ongeveer 32,5% van het technisch maximum op het geprognoseerde piekmoment en kan het verbruik op de streng weer toenemen totdat opnieuw de 65% wordt bereikt. De utilisatiefactor in Paragraaf 2.2.2 sluit aan op dit proces.

Binnen de levenscyclus van een middenspanningslus is het dus denkbaar dat een streng voor meerdere jaren structureel onderworpen is aan een belasting die dicht bij “congestie” zit. Voor de kabelsegmenten aan het begin van de streng geldt de utilisatiefactor uit Paragraaf 2.2.2 dan dus niet en moet uitgegaan worden van een potentiële piekbelasting van 66% van de technisch maximaal acceptabele belasting, overeenkomstig met een gemiddelde belasting van 33% van het technisch maximum vanwege de patroonfactor, ook genoemd in Paragraaf 2.2.2. Het moet als geloofwaardig beschouwd worden dat – gegeven deze gebruiken qua kabelbeheer – tenminste enkele drinkwaterleidingen worden blootgesteld aan de thermische uitstraling die hoort bij een gemiddelde belasting van 33% van het technisch maximum. Omdat de belasting van kabels afneemt over de lengte van een lus, zal het in de regel niet gebeuren dat alle naastgelegen drinkwaterleidingen aan die 33% worden blootgesteld. De omvang van “hotspots” hangt af van de lengte van de lus en de verdeling van de belasting: wanneer het grootste deel van het verbruik achterin de lus zit, is het grootste deel van de lus warmer.

2.4 Uitgangspunten bij de stadsbrede scenario's

2.4.1 Kansen op combinaties van infrastructuur

Omdat het elektriciteitsnet een hele andere structuur volgt dan het leidingnet, is het lastig om op voorhand te voorspellen welke typen kabels lokaal parallel liggen aan welke type leidingen. Voor één specifieke stad kan dit bepaald worden met behulp van een GIS-analyse, maar we willen in het onderzoek voorkomen dat de conclusies te veel op een paar specifieke situaties geënt zijn. Om een stadsbreed scenario te genereren, construeren we daarom eerst een tabel die voor een aantal waterinfrastructuurklassen (WIK) aangeeft wat de aangenomen kans is dat die WIK naast een bepaald KIK ligt. De overwogen WIK zijn:

- **WIK_P: het primaire net of het secundaire hoofdnet met $D > 250$ mm.** Het primaire net betreft de (transport)leidingen die bronnen en gebieden met elkaar verbinden. Soms lopen deze transportleidingen door de stad, soms takt het secundaire hoofdnet van het primaire net af om door de stad te lopen.
- **WIK_S: de lussen in het secundaire net met $160 \text{ mm} \leq D \leq 250 \text{ mm}$.** De lussen in het secundaire net takken af van het transportnet (of van het secundaire hoofdnet als daar mee wordt gewerkt) om water naar de verschillende wijken in de stad te brengen.
- **WIK_T het tertiaire net met $D < 160 \text{ mm}$.** Het tertiaire net is het deel van het leidingnet dat aftakt van de secundaire lussen om enkele straten (in clusters van 100 tot 200 huizen) te voorzien van water.

Tabel 9 in Hoofdstuk 5 geeft per WIK aan wat de kans is dat leidingen van dit typen naast kabels van ofwel type KIK1 ofwel type KIK4 liggen (zie ook Paragraaf 2.3.2 wat betreft deze selectie van kabeltypen). De volgende analysestappen waren van belang bij de totstandkoming van die tabel:

- Alliander heeft in samenwerking met Vitens de stad Almere geanalyseerd. Per WIK hebben ze in kaart gebracht hoeveel procent van de leidinglengte naast (dat wil zeggen: horizontale afstand zonder informatie over eventueel diepteverschil) iedere KIK ligt, binnen een afstand van 3 meter. Een samenvatting van de uitkomsten van deze analyse is opgenomen in Bijlage II. De basiswaarden in Tabel 7 volgden uit deze data, zoals verderop beschreven in Paragraaf 5.2.2.
- Evides heeft voor het leveringsgebied Rijnmond per buurt in kaart gebracht hoeveel procent van de leidinglengte binnen anderhalve meter van middenspanning ligt (met de opmerking dat laagspanning altijd wel in de buurt ligt). Een samenvatting van de uitkomsten van deze analyse is opgenomen in Bijlage II. Deze data geven daarmee inzicht in de realistische spreiding die kan optreden in het percentage langsligging in verschillende gebieden (namelijk: tussen de 10% en de 60% van de totale leidinglengte in een buurt ligt binnen 1,5 m van middenspanning, gemiddeld 18,4% met een standaarddeviatie van 13,3%). De bandbreedtes genoemd in Paragraaf 5.3.2 zijn gekozen om recht te doen aan die spreiding (20% minder tot 60% extra langsligging van middenspanning, naar rato verdeeld over de drie WIK).

2.4.2 Scenario's qua kabelredundantie

Zoals beschreven in Paragraaf 2.2.2 en in Paragraaf 2.3.2 is de utiliteitsfactor – de resterende ruimte qua belastbaarheid in de kabels – belangrijk voor de thermische uitstraling. Om dat effect zichtbaar te maken op stedelijke schaal worden drie scenario's gebruikt:

- i. De utiliteitsfactor wordt structureel doorgevoerd en gehandhaafd voor de komende decennia met oog op stedelijke groei. Er wordt dan voor alle leidingen in het stadsbrede scenario gerekend met de thermische uitstraling van "CS1 normaal" (KIK 1) en "CS4 normaal" (KIK 4) zoals weergegeven in Figuur 2.
- ii. De utiliteitsfactor wordt structureel aangelegd, maar kan niet worden gehandhaafd door groei in demografie, groei in industrie of groei in verbruik. Ook wanneer alle lussen in de stad de staat van 'congestie' benaderen zal slechts een beperkt gedeelte van kabelsegmenten maximaal belast worden (de segmenten aan de uiteinden van de lussen). Er wordt dan gerekend met de thermische uitstraling van "CS1 normaal" (KIK 1) en "CS4 normaal" (KIK 4) zoals weergegeven in Figuur 2 voor 90% van de leidinglengte in het stadsbrede scenario. Voor de overige 10% van de leidinglengte wordt gerekend met de thermische uitstraling van "CS1 hot spot" en "CS4 hot spot" zoals weergegeven in Figuur 2.

- iii. Het kabelnetwerk wordt serieus overbelast ten opzichte van huidige standaarden (bijvoorbeeld vanwege duivelse dilemma's gedurende de energietransitie). Er wordt dan voor alle leidingen in het stadsbrede scenario gerekend met de thermische uitstraling van "CS1 normaal" en "CS4 normaal" zoals weergegeven in Figuur 2. Merk op: dit moet worden gezien als een theoretisch, extreem scenario. Vandaag de dag wordt een dergelijke belasting als een onrealistisch doemscenario beschouwd dat grote negatieve gevolgen zou hebben voor de levensduur van het elektriciteitsnet.

2.4.3 Genereren en doorrekenen van stadsbrede scenario's

De stadsbrede scenario's worden gegenereerd op basis van een EPANET2 hydraulisch leidingnetmodel. Op basis van kansen zoals in Tabel 7 en Tabel 9 in Hoofdstuk 5 kan met behulp van een script een maatgevend lokaal scenario toegewezen worden aan ieder leidingsegment in het model. Om te voorkomen dat de resultaten te veel specifiek zijn voor één bepaalde set aannamen rond de combinaties van infrastructuur, worden varianten van een stadsbreed scenario opgezet waarbij de verhoudingen zoals in Tabel 7 op consistente wijze worden gevarieerd binnen de bandbreedtes beschreven in paragraaf 5.3.2. Op die manier zien we hoe de thermische invloed verandert wanneer er substantieel meer of minder middenspanning aanwezig is in een gebied.

Een leidingnetmodel met toegewezen lokale scenario's – op basis van één van de drie mogelijke redundantiescenario's en volgens één bepaalde set van kansen gekozen binnen de bandbreedtes besproken in Paragraaf 5.3.2 – noemen we een stadsbreed scenario. In totaal zijn er 18 stadsbrede scenario's beschouwd: 3 groepen (voor redundantiescenario i., ii., of iii.) van 7 opties qua langsligingspercentage (binnen de bandbreedten in Paragraaf 5.3.2).

Eén stadsbreed scenario is 7 keer doorgerekend: één keer zonder de kabelinfrastructuur (referentie), één keer met alle kabelinfrastructuur parallel op 0 m afstand, één keer met de kabelinfrastructuur parallel op 0,5 m afstand, enzovoorts. Op basis van de aangenomen afstand en de toegewezen lokale scenario's kan dan aan ieder leidingsegment de juiste thermische randvoorwaarde worden opgelegd, afgeleid uit de uitkomsten van de lokale analyses zoals samengevat in Figuur 2. Iedere iteratie wordt doorgerekend met behulp van het watertemperatuurmodel (WTM+) om vast te stellen wat de temperatuur van het stromende water in dat geval wordt in ieder segment. Door steeds de uitkomsten bij kabels op een bepaalde afstand te vergelijken met uitkomsten van de referentie, wordt inzicht verkregen in de invloed van afstand tussen kabels en leidingen op de drinkwatertemperatuur.

2.4.4 Leidingnet en leidingeigenschappen

Specifiek wordt in de hierboven beschreven analyse steeds het leidingnetmodel van Almere gebruikt. Dit model is ook gebruikt tijdens het originele TKI-Engine [van Esch, 2022]. Dit specifieke leidingnet is indertijd en nu opnieuw gekozen omdat Almere qua structuur representatief is voor zowel oudere als nieuwere typen drinkwaterleidingnet in Nederland. De stadsdelen hebben allemaal een ander karakter en geven ieder een goed beeld van een ander type leidingnet – Almere Haven is opgebouwd uit typische bloemkoolwijken uit de jaren 1980; Almere Stad heeft wijken die wat dichter bebouwd zijn en Almere Buiten en Almere Poort hebben een aantal nieuwbouwwijken met drinkwaternetten die aangelegd zijn als zelfreinigende netten (kleinere diameters en vertakt, ca. 100 woningen in een sectie).

De uitgangspunten qua leidingeigenschappen zijn:

- Het gebruikte leidingmateriaal is PVC met warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda = 0,16 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$. PVC is het voorkeursmateriaal en wordt nu (en naar verwachting in de toekomst) in het overgrote gedeelte van de gevallen gebruikt.
- Leidingen in het netwerk hebben diameters van $\leq \varnothing 63$ (14%), $\varnothing 110$ (51%), $\varnothing 160$ (15%), $\varnothing 200$ (5%), $\varnothing 310$ (6%), en $> \varnothing 400$ mm (9%).

- Qua wanddikte wordt 7% van de diameter aangenomen. Dit levert een overschatting van de wanddikte en isolerende werking van de leidingwand op, maar de invloed hiervan is klein binnen de totale set aan invloedsfactoren.

Belangrijke uitgangspunten bij de modellering zijn:

- Met het hydraulisch model wordt steeds 72 uur aan stroming gesimuleerd, met tijdstappen van 1 minuut. De verblijftijd van een pakketje water varieert in dit leidingnet tussen de 5 en de 24 uur.
- De modelering is op basis van een repeterend watervraagpatroon met een lengte 24 uur, typerend voor het verbruik van de stad als geheel op een gemiddelde dag. Dit resulteert in stroomsnelheden tussen de <0.01 en de $1,36 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$. Dit gemiddelde gedrag van de stad wordt toegepast op alle vraagknopen in het model (naar rato van de gemiddelde vraag op die knoop). In de uiteinden van het leidingnet kan dat tot lokale overschatting van de minimum stroomsnelheden leiden (op lokaal niveau kan het water stilstaan als niemand water gebruikt terwijl er op stadsniveau altijd wel wat stroomt). Dat hangt samen met een onderschatting van de thermische beïnvloeding.
- Drinkwaterbedrijven werken voor sommige ontwerpdoeleinden ook wel met een vraagpatroon representatief voor dagen met maximaal waterverbruik. In die situaties zou het water qua verblijftijd de minste tijd krijgen om op te warmen. De hoogste gemiddelde temperaturen in de bodem volgen doorgaans echter enkele maanden na de weken met de maximale watervraag (de warmste dagen) en op dat moment is het vraagpatroon voor een gemiddelde dag alweer aan de orde. Daarom blijft de studie beperkt tot het gebruik van het patroon voor een gemiddelde dag.
- Er zijn twee bronnen, met brontemperaturen van 14°C en 15°C . Deze temperaturen zijn constant verondersteld (verandert traag ten opzichte van een paar dagen, typerend voor grondwaterbronnen). Met name voor oppervlaktewaterbronnen kan de brontemperatuur veel hoger liggen. De modellering laat zien dat het drinkwater snel de omgevingstemperatuur aanneemt zodra het de transportleidingen verlaat (zie ook Paragraaf 5.4.1), waardoor het niet nodig wordt geacht om extra scenario's met verschillende brontemperaturen te onderzoeken. Blokker Pan [2023] hebben dergelijke berekeningen wel uitgevoerd, waaruit bleek dat het effect van brontemperatuur verwaarloosbaar was.
- De basistemperatuur van de bodem (zonder aanwezigheid van kabels of leidingen) op 1 m diepte wordt constant verondersteld op $23,5^\circ\text{C}$. Dit komt overeen met de hoogst gemeten bodemtemperatuur op 1 m diepte in het jaar 2016 en was ook de referentietemperatuur in voorgaande studies met betrekking tot warmtenetten. De consequenties van deze keuze zijn beperkt omdat deze studie zich richt op de invloed van elektriciteitskabels t.o.v. de situatie zonder elektriciteitskabels. Dit betekent dat vooral de verschiltemperatuur tussen de situatie met en zonder warmtenet van belang is, en dat verschil blijkt in de studie vrijwel onafhankelijk te zijn van bodemtemperatuur of jaargetijde (zie ook Figuur 14 in Hoofdstuk 3 en [van Esch, 2022]). Daarom wordt de basistemperatuur niet verder gevarieerd. Deze basistemperatuur wordt in KIK 0 opgelegd aan ieder leidingsegment in het WTM+.

2.4.5 Gevoeligheidsstudie

De probabilistische aanpak maakt dat verschillende herhalingen van deze exercitie verschillende uitkomsten zullen hebben. Enerzijds is dat positief, omdat op die manier wat breder gekeken kan worden naar de invloed van afstand tussen kabels en leidingen op de drinkwatertemperatuur, los van de specifieke lay-out van een stad. Anderzijds moet voorkomen worden dat de conclusies worden beïnvloed door de toevallige uitkomst van een kansproces. Dat laatste kan ondervangen worden door het proces voldoende vaak te herhalen. Uit tussenresultaten met een vijftal repetities blijkt dat de resultaten minder dan 1% variëren tussen repetities (dat wil zeggen: het percentage opgewarmde leidingen is minder dan 1 hoger of lager).

2.4.6 Vertaling van de berekeningen naar uitkomsten

In de uitkomsten van de stadsbrede berekening kan teruggevonden worden wat de drinkwatertemperatuur op ieder moment in iedere leiding is tijdens de simulatie. Conclusies over de thermische beïnvloeding van het water worden gebaseerd op de temperaturen in de laatste 24 uur, zodat in de eerste 48 uur van de gesimuleerde tijd de

verblijftijden de tijd krijgen om goed te ontwikkelen. De data uit de laatste 24 uur aan gesimuleerde tijd wordt als volgt verwerkt. Per afstand tussen kabels en leidingen wordt per leiding bepaald wat daarin over die 24 uur de gemiddelde temperatuur is. Vervolgens wordt bepaald welk percentage van de leidinglengte $>0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $>0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $>1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $>1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ of $>2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ warmer wordt in het bijzijn van kabels op die afstand ten opzichte van de gemiddelde temperatuur in het referentiescenario KIK 0. De data worden verwerkt tot een tabel zoals Tabel 1.

Tabel 1. Voorbeeld van de structuur waarin de eindresultaten worden weergegeven. De percentages geven weer hoeveel procent van de leidinglengte of hoeveel procent van het geleverde water onderhevig is aan een bepaalde temperatuurverhoging wanneer een bepaalde afstand tussen kabels en leidingen van kracht is.

		Temperatuurverhoging t.o.v. referentie [$^{\circ}\text{C}$]				
		$> 0,25$	$> 0,5$	$> 1,0$	$> 1,5$	$> 2,0$
Afstand kabels (dagmaat) [m]	0	x%	x%	x%	x%	x%
	0,5	x%	x%	x%	x%	x%
	1	x%	x%	x%	x%	x%
	1,5	x%	x%	x%	x%	x%
	2	x%	x%	x%	x%	x%
	2,5	x%	x%	x%	x%	x%
	3	x%	x%	x%	x%	x%

3 Analyse van de lokale thermische invloed van vijf kabelinfrastructuurklassen op de drinkwatertemperatuur

3.1 Inleiding

State-of-the-art benaderingen voor het modelleren van temperaturen binnen drinkwaternetten bestaan uit twee stappen [Blokker et al., 2024]. De eerste stap beoordeelt de temperaturen die zich in de ondergrond ontwikkelen op een specifieke locatie, dat wil zeggen binnen een dwarsdoorsnede loodrecht op de stromingsrichting van het water. Met de modellen die in deze stap worden gebruikt, beoordeelt men daardoor niet alleen de invloed van het microklimaat op ondergrondse temperaturen, maar kan men ook rekening houden met de mogelijke invloed van nabijgelegen infrastructuur, zoals warmtenetten en elektriciteitskabels. Deze modellen zijn doorgaans gebaseerd op de eindige-elementenmethode (FEM) en lossen de partiële differentiaalvergelijkingen op die de warmteoverdrachtsprocessen beschrijven [Zeidan en van Summeren, 2024].

De in dit hoofdstuk gepresenteerde analyse vormt de eerste stap van het hierboven beschreven raamwerk voor temperatuurmodellering. De doelstellingen van deze analyse zijn:

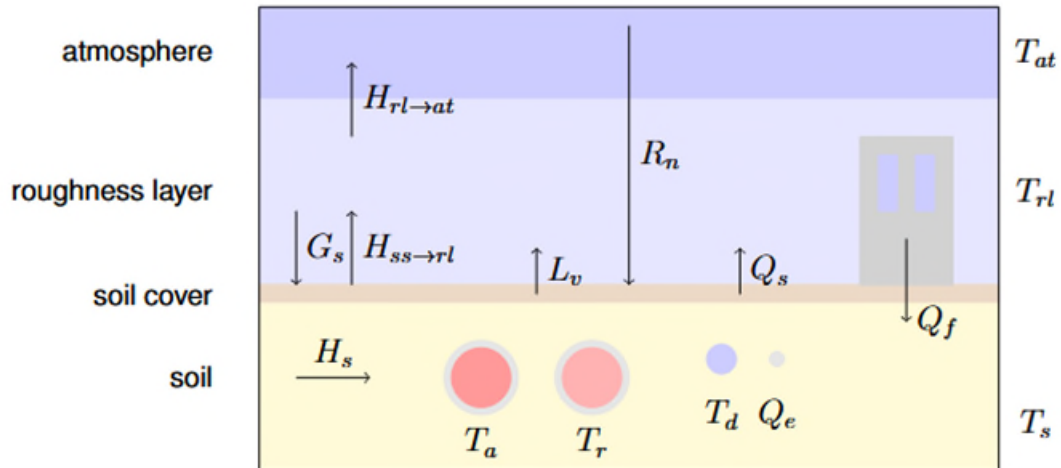
- 1 Het beoordelen van de invloed van warmte die door elektriciteitskabels wordt afgegeven op de temperatuur van nabijgelegen drinkwaterleidingen.
- 2 Het bepalen van ondergrondse temperatuurprofielen rond drinkwaterleidingen voor verschillende klassen van elektriciteitskabelinfrastructuur, die vervolgens worden gebruikt als randvoorwaarden voor de stadsbrede netwerkanalyse die in Hoofdstuk 5 wordt beschreven.

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Paragraaf 3.2 geeft een overzicht van het gekoppelde microklimaat- en ondergrondse warmteoverdrachtsmodel (BTM+). Paragraaf 3.3 beschrijft de modelleringsaanpak die is toegepast voor elektriciteitskabels en hun thermische uitstraling. Paragraaf 3.4 presenteert de invoerdata en gevoeligheidsscenario's die in de analyse zijn gebruikt. Paragraaf 3.5 bespreekt de modelresultaten, waaronder het opwarmgedrag van het model, referentiecondities zonder elektriciteitskabels en de effecten van verschillende kabelbelastingsscenario's.

3.2 Gekoppeld microklimaat- en bodemtemperatuurmodel (BTM+)

Deze paragraaf geeft een kort overzicht van het BTM+-model en van de basisprincipes van de beschouwde warmteoverdrachtsprocessen. BTM+ is oorspronkelijk ontwikkeld door van Esch [2022] binnen de PLAXIS-softwareomgeving, waarna Zeidan en Van Summeren [2024] het model in COMSOL Multiphysics hebben geïmplementeerd. Conceptueel bestaat BTM+ uit twee hoofdcomponenten: een ondergronds warmteoverdrachtsmodel (voor bodemtemperaturen) en een microklimaatmodel (voor bovengrondse, atmosferische temperaturen). Deze twee componenten zijn volledig gekoppeld, wat betekent dat interacties tussen atmosferische temperaturen en bodemtemperaturen gelijktijdig worden opgelost in plaats van opeenvolgend. Daardoor beïnvloeden atmosferische omstandigheden en de bodemomstandigheden elkaar.

Het modeldomein is tweedimensionaal: temperaturen worden berekend binnen een dwarsdoorsnede loodrecht op de drinkwaterleiding. Zoals weergegeven in Figuur 4 bestaat het model uit drie conceptuele lagen: de atmosfeer, de ruwheidslaag (*roughness layer*) en de ondergrondse laag. Alleen de ondergrondse laag wordt gesimuleerd met behulp van eindige-elementmodellering. De atmosfeer en de ruwheidslagen worden gerepresenteerd met het gekoppelde microklimaatmodel: een combinatie van gewone differentiaalvergelijkingen en analytische formuleringen.



Figuur 4. Het systeem achter het BTM+ model. Gebaseerd op [van Esch, 2022].

3.2.1 Microklimaatmodel

Het microklimaatmodel dat in BTM+ COMSOL is geïmplementeerd, is oorspronkelijk afgeleid door Van der Molen [2002], aangepast door Blokker en Pieterse-Quirijns [2013] en later uitgebreid door Agudelo-Vera et al. [2017]. De warmtebalansvergelijking aan het maaiveldoppervlak wordt gegeven door:

$$G_s = R_n - H_{ss \rightarrow rl} - L_v + Q_f - Q_s \quad (1)$$

Alle termen in Vergelijking (1) zijn uitgedrukt in W/m². Daarbij:

- staat R_n voor de netto warmte-instraling;
- staat $H_{ss \rightarrow rl}$ voor de *sensible heat flux* tussen het bodemoppervlak en de ruwheidslaag;
- staat L_v voor de *latent heat flux*, die het koelende effect weergeeft dat samenhangt met verdamping van vocht vanaf het bodemoppervlak;
- staat Q_f voor de antropogene warmtebron, die afhangt van de mate van verstedelijking;
- staat Q_s voor de warmte die in de oppervlaktebedekking wordt opgeslagen; en
- staat G_s voor de warmtestroom die de ondergrond binnendringt.

Omdat elke term aan de rechterzijde van Vergelijking (1) afhankelijk is van de maaiveldtemperatuur, wordt het microklimaatmodel gekoppeld aan het ondergrondse model. Het meenemen van de verschillende microklimatologische processen die in Vergelijking (1) zijn weergegeven, is vooral belangrijk bij het analyseren van temperaturen op geringe diepte, zoals de diepten waarop drinkwaterleidingen en elektriciteitskabels doorgaans worden aangelegd. Hierdoor wordt het mogelijk om recht te doen aan het feit dat kabels een deel van hun warmte afvoeren via de atmosfeer. Dit kan niet in vereenvoudigde benaderingen die de maaiveldtemperatuur bijvoorbeeld alleen benaderen op basis van de atmosferische temperatuur. Die versimpelde modellen kunnen de werkelijke maaiveldtemperatuur met 5 °C onderschatten (blijkt uit tussentijdse berekeningen).

3.2.2 Bodemmodel

Het ondergrondse warmteoverdrachtsmodel gaat uit van de volgende aannames:

- **Transportmechanisme.** Warmteoverdracht in de bodem vindt uitsluitend plaats door geleiding; convectief warmtetransport door grondwater wordt verwaarloosd. Daarom wordt in COMSOL alleen de module *Heat Transfer in Solids* gebruikt.

- **Materiaalfase.** De bodem wordt beschouwd als een eenfasig materiaal, wat betekent dat de warmtegeleidingseigenschappen overal gelijk zijn. Gedeeltelijke verzadiging wordt niet expliciet gemodelleerd. De invloed van verschillende bodemtypen op de drinkwatertemperaturen wordt onderzocht via de gevoeligheidsscenario's die in Paragraaf 3.4.4 worden beschreven.
- **Thermische eigenschappen.** De thermische eigenschappen van het bodemskelet en het poriewater worden weergegeven met één set gehomogeniseerde bulkeigenschappen.
- **Tijdvariatie van eigenschappen.** Thermische eigenschappen worden verondersteld in de tijd constant te blijven.

Op basis van deze aannames wordt warmtetransport in de ondergrond beschreven door de volgende vergelijking [Van Esch, 2010; Brinkgreve et al., 2003]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{i,j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

waarbij:

- ρ [kg/m³] de dichtheid van de bodem is;
- c [J/kgK] de soortelijke warmtecapaciteit van de bodem is;
- $\lambda_{i,j}$ [W/mK] de tensor voor de thermische geleidbaarheid van de bodem is; en
- T [K] de ondergrondse temperatuur is.

In de BTM+-implementatie in COMSOL wordt Vergelijking (2) opgelost met behulp van de fysische module *Heat Transfer in Solids*. Om de interacties tussen de ondergrond, het microklimaat en andere modelcomponenten te beschrijven, worden de volgende randvoorwaarden toegepast:

- **Inkomende warmtestroom.** Inkomende warmtestromen worden opgelegd aan het maaiveld. Deze warmtestromen zijn het resultaat van netto straling (R_n), latente warmtestroom (L_v), antropogene warmtebronnen (Q_f) en warmteopslag in de oppervlaktebedekking (Q_s), zoals gedefinieerd in Vergelijking (1).
- **Uitgezonden straling.** Warmtestraling die door het bodemoppervlak wordt uitgezonden, wordt meegenomen als onderdeel van de netto stralingsbalans en opgelegd aan het maaiveld.
- **Robin-randvoorwaarde voor warmte-overdracht door convectie.** Aan het bodemoppervlak wordt ook een Robin-type randvoorwaarde toegepast om warmte-uitwisseling door convectie tussen het maaiveldoppervlak en de lucht in de ruwe laag te beschrijven. Deze formulering beschrijft de effecten van luchtbeweging en wind zonder de atmosferische stroming expliciet te modelleren.
- **(Vaste temperatuur op de drinkwaterleiding).** Aan de binnenwand van de drinkwaterleiding kan een randvoorwaarde met vaste temperatuur worden opgelegd om de thermische invloed van stromend drinkwater op de omringende bodem weer te geven. Deze randvoorwaarde wordt alleen gebruikt in de actieve (continue) modelleringsaanpak. Omdat de analyse in dit hoofdstuk een passieve aanpak volgt, is deze randvoorwaarde weggelaten.
- **Thermische-isolatierandvoorwaarde.** Langs de overige drie zijden van het rechthoekige ondergrondse domein worden thermische-isolatierandvoorwaarden toegepast.

De resultaten die met BTM+ worden verkregen, moeten worden geïnterpreteerd als een theoretische thermische toestand, omdat het model uitgaat van stilstaand water in de drinkwaterleiding en vervolgens de stationaire temperaturen in het systeem berekent. In de praktijk komt deze situatie zelden langdurig voor. De uitkomsten van BTM+ kunnen het best worden beschouwd als de theoretische eindtemperatuur die een waterleiding en de omliggende bodem zouden bereiken nadat zij over een lange afstand parallel aan de elektriciteitskabel lopen. De invloed van microklimaat en elektriciteitskabels op de daadwerkelijke drinkwatertemperatuur onder bedrijfsomstandigheden kan daarom pas volledig worden beoordeeld wanneer stroomsnelheid en verblijftijd in de analyse worden meegenomen. Zoals in de inleiding beschreven, worden de door BTM+ berekende temperatuurprofielen gebruikt als invoer voor de stadsbrede analyses op netwerkschaal die in Hoofdstuk 5 worden beschreven.

3.3 Het modeleren van de warmteverliezen van kabels

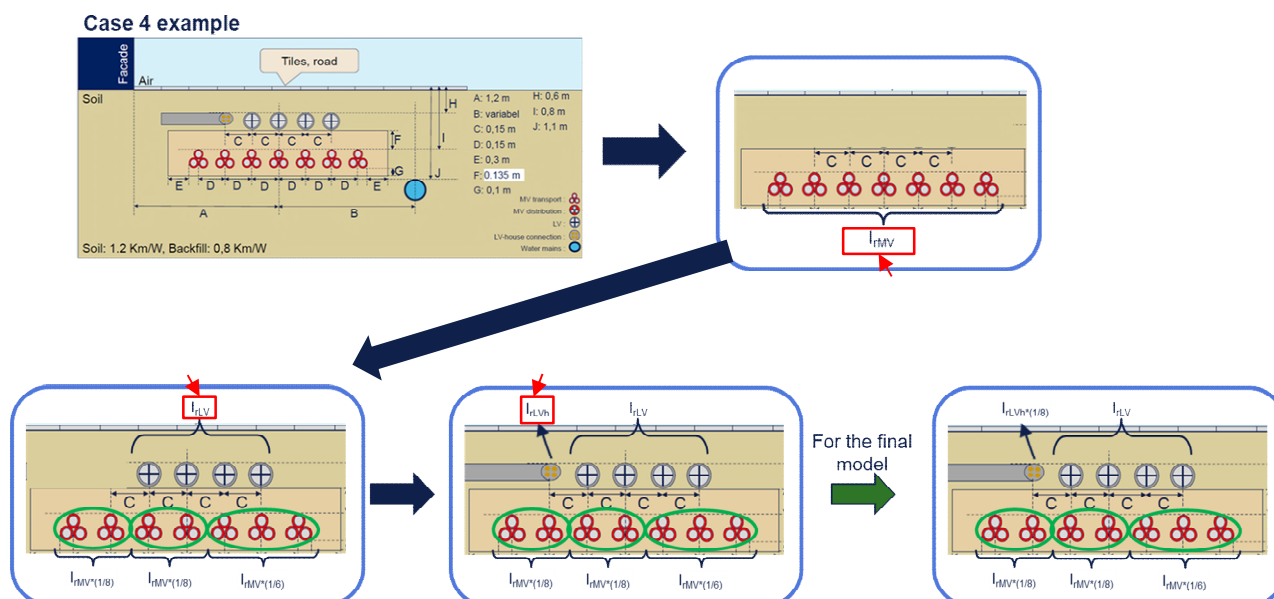
3.3.1 Afschatten van kabelbelasting

Er zijn berekeningen uitgevoerd om de typische stroom te bepalen die elk kabeltype in elke casus zou voeren. Hierbij wordt uitgegaan van een stationaire belasting die leidt tot een warmteverlies equivalent aan de gemiddelde verliezen bij de dynamische belastingen waaraan kabels in het veld worden blootgesteld. In de casussen van de netbeheerders (Bijlage I) zijn de exacte kabelbelastingen of hun stroombelastbaarheden niet gespecificeerd. Heironder is beschreven hoe een realistische belasting is ingeschat.

De aanpak begint met het bepalen van de ampaciteit, de maximale stroom die een kabel mag voeren zonder dat de levensduur drastisch wordt verlaagd. De ampaciteitsberekeningen volgen de norm IEC 60287. Alle kabels van elk kabeltype worden achtereenvolgens aan de ampaciteitsberekening toegevoegd, te beginnen met het kabeltype dat het dichtst bij de waterleiding is aangelegd. Dit betekent dat voor het eerste gesimuleerde kabeltype de enige aanwezige warmtebron afkomstig is van de kabels van hetzelfde type. De ampaciteit wordt berekend onder de aanname dat de kabels gelijkmatig worden belast. De daadwerkelijke belasting van de kabels wordt vervolgens afgeleid als een fractie van de ampaciteit om typische aanlegomstandigheden te beschrijven (kabels worden doorgaans niet maximaal belast). Dit gebeurt door de ampaciteit te vermenigvuldigen met een aantal belastingsfactoren (zie Paragraaf 3.3.2). Dan wordt het volgende kabeltype, dat het dichtst bij de waterleiding ligt, aan de ampaciteitsberekening toegevoegd. De maximale capaciteit daarvan wordt bepaald terwijl de eerder gesimuleerde kabels op hun aangepaste stroomniveaus worden gehandhaafd. Deze nieuw berekende ampaciteit wordt daarna aangepast door opnieuw de belastingsfactoren toe te passen. Dit proces wordt herhaald totdat alle kabeltypen in de casus zijn opgenomen. Een grafische weergave van het proces is weergegeven in Figuur 5 en deze wordt verder toegelicht in paragraaf 3.3.2.

Voor de ampaciteitsberekeningen zijn de volgende aannames gehanteerd:

- een bodemtemperatuur op de aanlegdiepte van 20 °C;
- thermische bodemeigenschappen in overeenstemming met de door de netbeheerders aangeleverde casussen (Figuur 36 in Bijlage I);
- alle kabels worden gemodelleerd als verbonden aan beide uiteinden;
- alle kabels van hetzelfde type worden als gelijkmatig belast beschouwd voordat de belastingsfactoren worden toegepast.

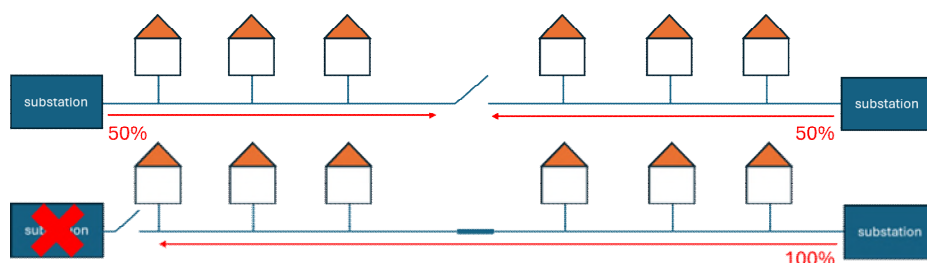


Figuur 5. Schematische weergave van het proces om de belasting van kabels te berekenen voor casus 4.

3.3.2 Belastingsfactoren

Om de belastingsomstandigheden te beschrijven die deze kabelsystemen doorgaans ervaren, zijn drie onafhankelijke belastingsfactoren op elke kabel toegepast om de belastingsgraad te bepalen ten opzichte van de maximale ontwerpcapaciteit die uit de ampaciteitsberekeningen is berekend (beschreven in Paragraaf 3.3.2):

- 1 **Redundantiefactor:** Er wordt aangenomen dat voor elk kabelcircuit ingebouwde redundantie aanwezig is voor het geval een kabel uitvalt, waardoor de kabels tijdens normaal bedrijf (zonder kabelstoring) niet volledig worden belast. De redundantie wordt afhankelijk van het spanningsniveau op verschillende manieren gerealiseerd:
 - 1 **MS-kabels:** De redundantie wordt gerealiseerd met parallelle kabels. De aanname is dat voor elke drie MS-kabels van hetzelfde type, twee kabels de totale belasting van de groep kunnen dragen als één kabel uitvalt. Dit betekent dat elke groep van drie MS-kabels onder normale bedrijfsomstandigheden tot 2/3 van de nominale capaciteit wordt belast. In sommige casussen is het totale aantal kabels van hetzelfde MS-kabeltype geen veelvoud van drie; de resterende kabels worden dan gegroepeerd per twee in plaats van drie. Dit betekent dat bij uitval van één kabel de overblijvende kabel in de groep van twee de belasting van twee kabels moet kunnen dragen. Dit leidt tot een redundantiefactor van 1/2 voor groepen van twee MS-kabels. Bij het kiezen van groepen van drie en van twee ligt de eerste groep van drie kabels altijd het dichtst bij de waterleiding.
 - 2 **LS-kabels:** De redundantie wordt gerealiseerd doordat kabels in een open-ringconfiguratie worden bedreven. Dit betekent dat tijdens normaal bedrijf elk kabeluiteinde slechts 50% van de totale belasting in de open ring voedt (bovenste deel van Figuur 5). Bij een storing of onderhoud aan één uiteinde van de kabel kan het defecte deel worden geïsoleerd en kan de netopening in het midden van de ring worden gesloten, zodat de levering via de volledige route vanaf één uiteinde wordt hersteld (onderste deel van Figuur 5). Dit betekent dat de kabel normaal gesproken wordt gebruikt op basis van 50% belasting van de open ring, maar is ontworpen om bij calamiteiten met 100% belasting te kunnen functioneren. Dit leidt tot een redundantiefactor van 1/2 voor LS-kabels.
- 2 **Patroonfactor:** Deze factor houdt rekening met de equivalente warmte die gedurende een dag wordt opgewekt tijdens een 24-uurs belastingspatroon dat dagelijks wordt herhaald. Het gemiddelde van de variërende belasting gedurende een dag wordt aangenomen 65% van de maximale capaciteit van de kabel, gedeeld door een dynamische factor van 1,2 (een factor die doorgaans op dit dagpatroon wordt toegepast). Dit leidt tot een totale dag-/nachtfactor van $0,65/1,2 = 1/2$.
- 3 **Utilisatiefactor:** Nieuw aangelegde aansluitingen worden ontworpen met aandacht voor toekomstige toenames in de belastingvraag. De werkelijke vraag kan zich in de tijd echter anders ontwikkelen dan voorspeld, waardoor verschillende benuttingsniveaus ontstaan ten opzichte van de maximale capaciteit van het circuit. Op basis van gebruikelijke planningsaannames wordt verwacht dat deze benutting minimaal 50% van de nominale capaciteit van het circuit bedraagt (zie ook Kader 1 in Hoofdstuk 2). Daarom wordt een rekenfactor van 1/2 toegepast.



Figuur 6. (Boven) LV-kabels, gescheiden door een netopening, tijdens normal bedrijf in open-ringconfiguratie. (Onder) LV-kabels aan één uiteinde onderbroken en verbonden via het sluiten van de netopening.

Samenvattend is de totale correctiefactor voor ieder kabeltype:

- MV-kabel in een groep van drie: $\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{6}$
- MV-kabel in een groep van twee: $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$
- LV-kabel: $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$

3.3.3 Modeleren van kabels in het BTM+

Om de rekentijd van het model te beperken, zijn de kabels in de FEM-analyse gemodelleerd als cilindrische warmtebronnen. De diameter van de cilindrische warmtebronnen is als volgt gekozen:

- Voor drie- of vieraderige kabels is de diameter van de cilinder gelijk aan de buitendiameter van de kabel.
- Voor drie kabels in klaverbladconfiguratie gebruikt de cilinder een equivalente diameter " D_{eq} " van het volledige klaverblad, die gelijk is aan $D_{eq} = D_c \sqrt{3}$. Hierbij is D_c de diameter van elke afzonderlijke kabel in het klaverblad.

De warmteafgifte van elke cilindrische warmtebron is gelijk aan de opgetelde kabelverliezen van de kabels die deze representeert:

- Voor drie- of vieraderige kabels is de warmteafgifte gelijk aan de totale verliezen van de volledige kabel.
- Voor drie kabels in klaverbladconfiguratie is de warmteafgifte gelijk aan de som van de verliezen van de drie eenaderige kabels in het klaverblad.

Kabelverliezen worden berekend als functie van de stroom die door elke kabel loopt, waarbij de stroom wordt bepaald zoals beschreven in de voorgaande paragrafen. Hoewel kabelverliezen worden beïnvloed door de geleidertemperatuur (vanwege de toename van de elektrische weerstand bij hogere temperaturen), wordt in deze analyse een constante geleidertemperatuur aangenomen. Het meenemen van temperatuurafhankelijke weerstand op basis van berekende geleidertemperaturen zou de modelcomplexiteit en rekentijd aanzienlijk vergroten. In plaats daarvan wordt voor iedere kabel de maximale weerstand, geldend bij maximale nominale geleidertemperatuur, aangenomen. Hoewel deze aanname kleine afwijkingen ten opzichte van werkelijke bedrijfsomstandigheden kan introduceren, wordt dit beschouwd als een passende, conservatieve aanname binnen deze studie. Ter illustratie: voor de MS-kabel van 630 mm² Al is berekend dat het verschil in berekende verliezen tussen een geleidertemperatuur van 40 °C en 90 °C ongeveer 13,7% bedraagt.

De aangenomen thermische eigenschappen van de bodem rondom de kabels en de waterleiding zijn als volgt:

- thermische weerstand van de bodem in overeenstemming met de casussen in Bijlage I;
- thermische diffusiviteit van de bodem afgeleid met behulp van de thermische bodemweerstand en Tabel D1 van IEC 60853-2.

3.4 Invoerdata en scenarios

3.4.1 Klimaatdata

De meteorologische gegevens die in alle BTM+-modellen in COMSOL in dit hoofdstuk zijn gebruikt, zijn afkomstig van het weerstation De Bilt en bestrijken de periode van 3 juni 2019 tot 3 juni 2020. De dataset omvat atmosferische temperatuur, kortgolfige straling, relatieve luchtvochtigheid, neerslag en windsnelheid. Tijdreeksen van de data zijn opgenomen in Bijlage III. Deze datasets worden gebruikt om het microklimaatmodel beschreven in Paragraaf 3.2.1 te voeden.

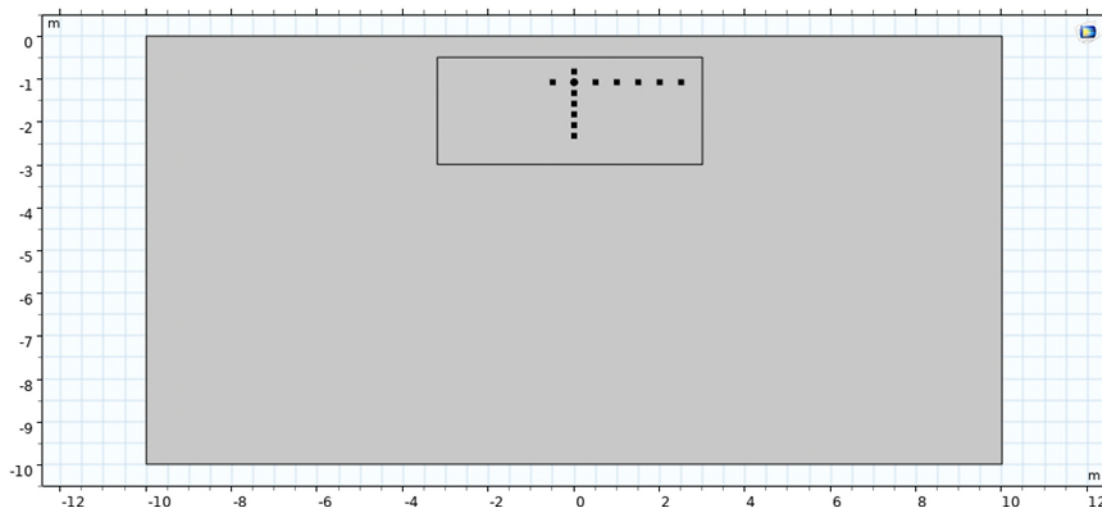
3.4.2 Kabelbelasting

De thermische verliezen van de kabels in iedere casus zijn berekend op basis van Paragraaf 3.3. Per casus zijn twee varianten van de thermische verliezen gebruikt: die voor kabels met en zonder utilisatiefactor in de belasting doorgevoerd. De specifieke waarden van de thermische verliezen per kabel per casus zijn opgenomen in Bijlage IV.

3.4.3 Geometrie en draadmodel

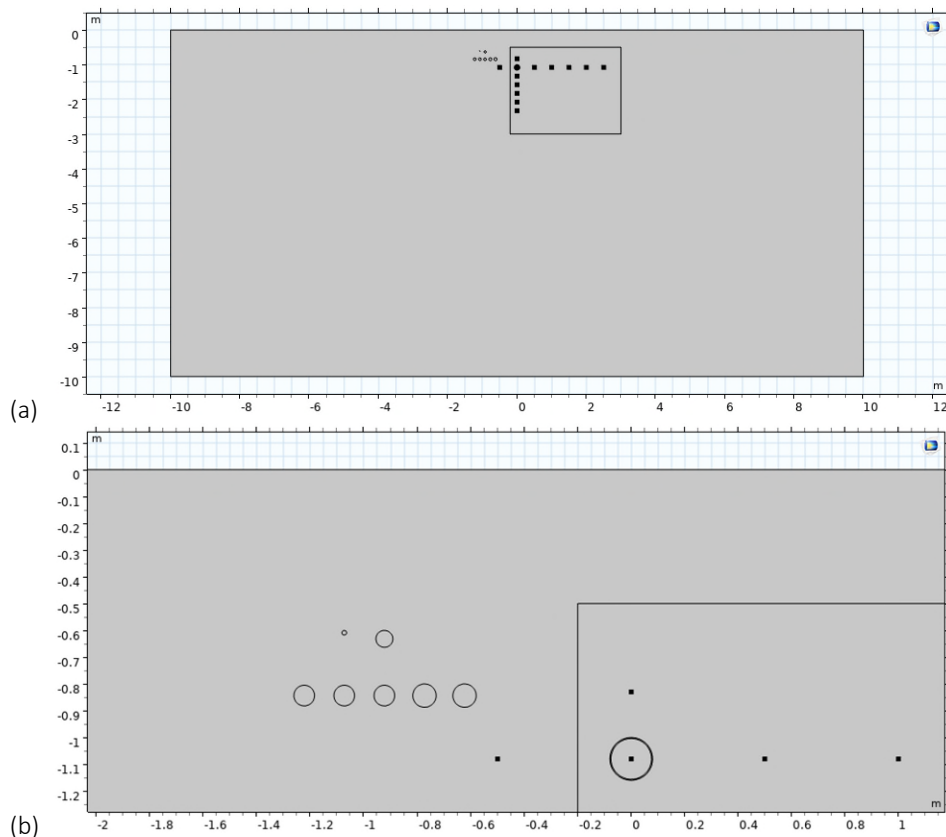
De basis van het draadmodel (*mesh*) van de eindigelementen-analyses is een set van 13 gedefinieerde meetpunten. Deze punten representeren het midden van een 160 mm diameter drinkwaterleiding op verschillende horizontale en verticale afstanden van de kabels. Figuur 7 geeft dit weer voor het referentiemodel zonder kabels. De zeven horizontale punten liggen op dezelfde aanlegdiepte van $y = 1,08$ m (zodat de kruin van de leiding op 1 m diepte ligt) en liggen 0,5 m uit elkaar. Evenzo liggen zeven verticale punten op dezelfde $x = 0$ m en liggen verticaal

0,25 m uit elkaar. Het punt met coördinaten $x = 0$ m en $y = 1,08$ m behoort tot zowel de horizontale als de verticale reeks en vormt het midden van het Comsol meetcoördinatensysteem.



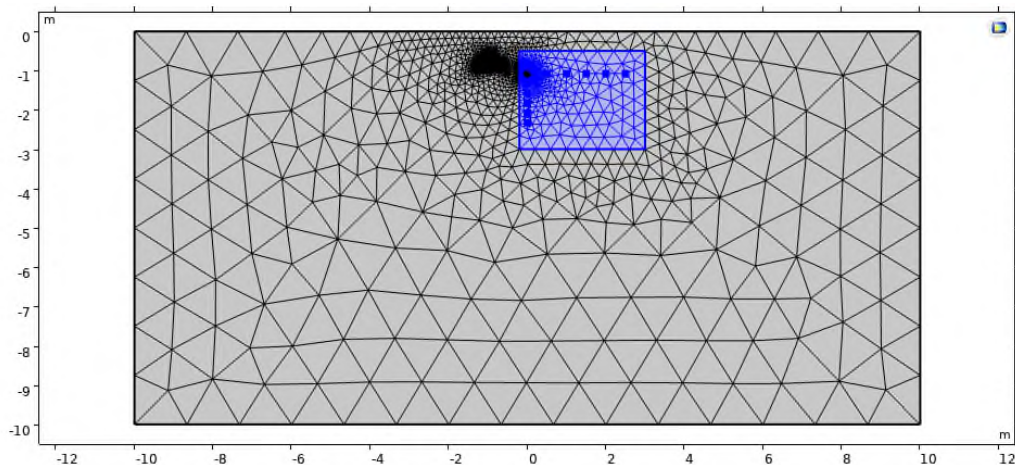
Figuur 7. Mogelijke locaties van de drinkwaterleiding in het referentiemodel zonder kabels. Het grijze vlak beslaat de volledige doorgerekende dwarsdoorsnede. Het vierkant daarbinnen is een domein dat gebruikt wordt voor het definiëren van het draadmodel.

De geometrie van de ondergrondse situatie is overgenomen uit de beschrijvingen van de netbeheerders in Bijlage I. Figuur 8 geeft weer hoe deze is ingetekend ten opzichte van de leidinglocaties. De leidinglocatie op $x = -0,5$ m beschrijft het punt waarop de linkerzijde van de leiding recht onder de rechterzijde van de dichtstbijzijnde kabel ligt. Let op: het coördinatensysteem dat wordt gebruikt bij het presenteren van de resultaten wijkt hiervan af; daar worden de horizontale afstanden tussen kabel en leiding gebruikt.



Figuur 8. Kabels uit KIK 3 ingetekend ten opzichte van de locaties van de drinkwaterleiding. Het grijze vlak in (a) beslaat representeert de volledige doorgerekende dwarsdoorsnede. Afbeelding (b) is een uitvergroting van een deel van (a). Het vierkant daarbinnen is een domein dat gebruikt wordt voor het definiëren van het draadmodel.

De rechthoeken die in het grijze domein in Figuur 7 en Figuur 8 zijn weergegeven, zijn domeinen die worden gebruikt voor de lokale verfijning van het draadmodel van de bodem (*mesh*), zoals weergegeven in Figuur 9. Deze verfijning was nodig om nauwkeurige temperatuurberekeningen te verkrijgen, met name bij het vergelijken van resultaten tussen meetpunten. De elementgrootte van het draadmodel binnen de rechthoeken is ingesteld in Comsol op “Extra fine”, terwijl voor de rest van het modeldomein de elementgrootte “Normal” is gebruikt. De geometrie van de domeinen die de kabels en leidinglocaties beschrijven was van dien aard dat ook daar de elementgrootte “Normal” voldoet. De verfijning vergroot zowel de rekentijd als de modelomvang aanzienlijk maar is nodig voor resultaten die niet worden beïnvloed door de fijnmazigheid van het draadmodel.



Figuur 9. Lokale verfijning van het draadmodel voor casus 3 aan de hand van het rechthoekige domein (blauw).

3.4.4 Scenario's voor boven- en ondergrondse omstandigheden

Om te beoordelen of bodemtype, maaiveldbedekking of weersomstandigheden effect hebben op de invloed van elektriciteitskabels op de drinkwatertemperatuur, worden zes gevoeligheidsscenario's beschouwd. Deze scenario's zijn vergelijkbaar met de scenario's die door Van Esch [2022] zijn beschouwd. De eerste vier scenario's combineren verschillende typen bodem en maaiveldbedekking:

- tegelverharding, gemiddelde bebouwing, droog zand (TMDz);
- tegelverharding, gemiddelde bebouwing, vochtig zand (TMVz);
- grasbedekking, gemiddelde bebouwing, droog zand (GMDz);
- grasbedekking, gemiddelde bebouwing, vochtig zand (GMVz).

De thermische bodemeigenschappen en kenmerken van de maaiveldbedekking voor elk scenario zijn weergegeven in Tabel 2. Daarnaast representeert het vijfde scenario 'schaduw'-weersomstandigheden door de albedowaarde op 1 te zetten. Alle overige modelparameters in het 'schaduw'-scenario zijn gelijk aan die in het TMDz-scenario. Ten slotte beschouwt het zesde scenario een hogere thermische geleidbaarheid van de bodem van 1,6 W/mK (nat zand). Dit scenario komt overeen met het oorspronkelijke TMDz-scenario dat door Van Esch [2022] is beschouwd, waarin voor alle scenario's deze waarde voor de thermische geleidbaarheid werd gebruikt.

Tabel 2. BTM+ modelparameters voor de verschillende scenario's voor boven- en ondergrondse omstandigheden.

Parameter	TMDz	TMVz	GMDz	GMVz	Shaduw	TMDz_k_iso_1.6	Eenheid
Albedo	0,12	0,12	0,19	0,19	1	0,12	-
Opp. warmteopslag coef 1	0,8	0,8	1	1	0,8	0,8	-
Opp. warmteopslag coef 2	-100	-100	-10	-10	-100	-100	W/m ²
Warmtecap. bodem	800	1000	800	1000	800	800	J/kgK
Warmtegel. bodem	1	1	1	1	1	1,6	W/mK
Bodemdichtheid	1600	1700	1600	1700	1600	1600	kg/m ³
Max water opslag	0,48	0,48	1	1	0,48	0,48	mm

3.4.5 Algemene invoerdata

Overige parameters en constanten die zijn gebruikt om het BTM+-model in COMSOL te voeden, zoals de Stefan-Boltzmannconstante voor het berekenen van langgolvige straling, zijn identiek aan de waarden die eerder door Van Esch [2022] en van Summeren en Zeidan [2024] zijn gerapporteerd.

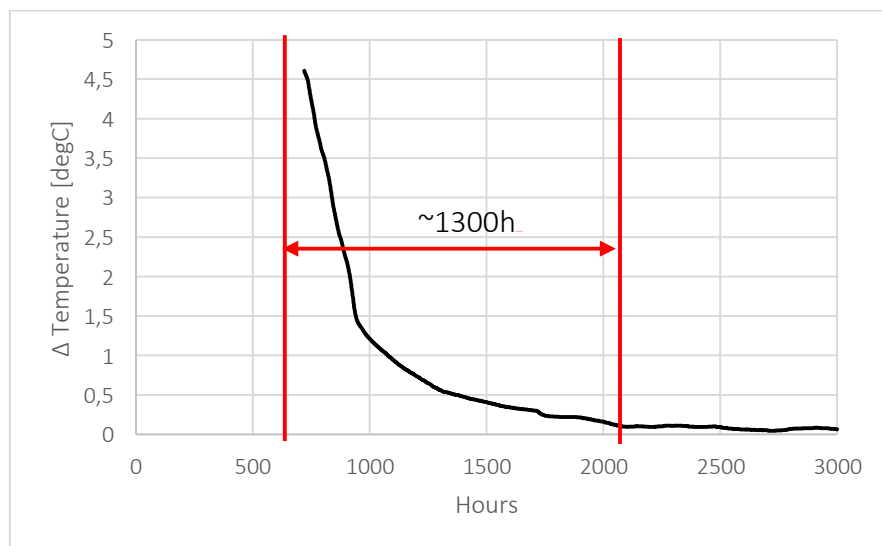
3.5 Resultaten

3.5.1 Opstarttijd in de modellering

Warmteoverdrachtsmodellen voor ondergrondse temperatuur, zoals BTM+, hebben een “opwarmperiode” nodig voordat hun resultaten als betrouwbaar kunnen worden beschouwd. Dit komt voort uit het feit dat deze modellen doorgaans starten vanuit een aangenomen initiële temperatuurverdeling in plaats van de werkelijke thermische toestand van de bodem. Naarmate de simulatie vordert op basis van werkelijke meteorologische gegevens, neemt de invloed van de initiële aannames geleidelijk af.

Studies naar landoppervlak- en klimaatmodellering hebben laten zien dat deze opwarmperiode, vaak aangeduid als *spin-up*, kan variëren van enkele maanden tot meerdere jaren. Bodemgerelateerde variabelen, met name bodemvocht, hebben vaak aanzienlijk langere perioden nodig om te stabiliseren dan atmosferische variabelen [Yang et al., 2012]. Het weglaten of verkorten van de *spin-up* kan ertoe leiden dat modeluitkomsten overstemd worden door arbitraire beginvoorwaarden in plaats van door werkelijke omgevingscondities, waardoor de betrouwbaarheid van de resultaten afneemt.

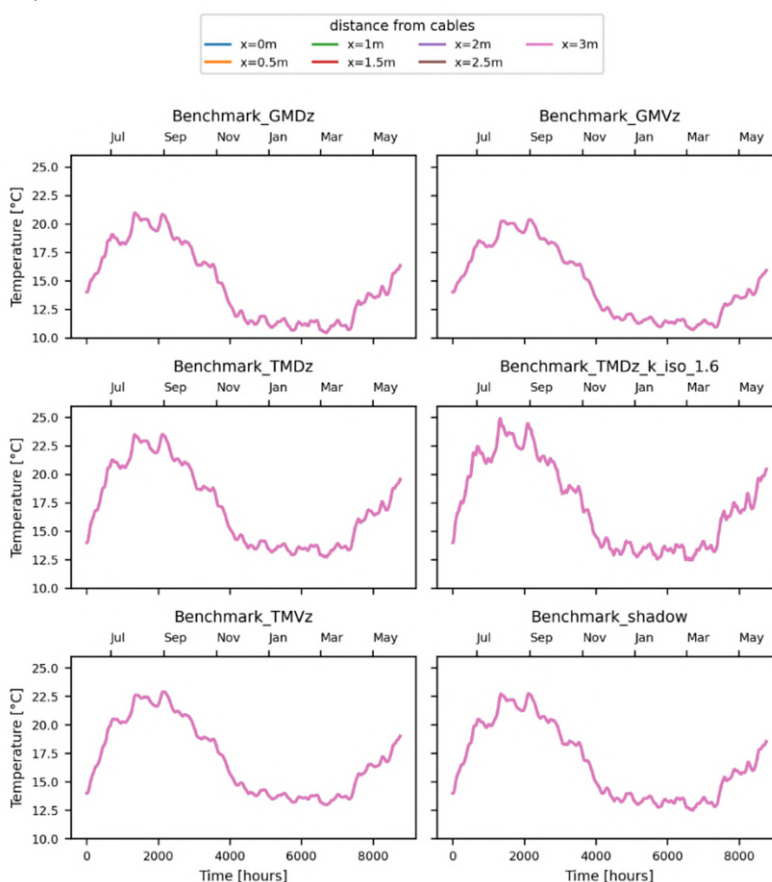
Om een geschikte opwarmperiode voor het BTM+-model en de geselecteerde invoergegevens te bepalen, is het volgende numerieke experiment uitgevoerd. Twee identieke referentiemodellen (zonder elektriciteitskabels) zijn opgesteld met een initiële bodemtemperatuur van 14 °C. Het enige verschil tussen beide modellen was de startdatum van de meteorologische tijdserie. De eerste simulatie werd geïnitieerd met KNMI-weergegevens vanaf 3 juni 2019, terwijl de tweede simulatie exact één maand later werd geïnitieerd (720 uur). De resultaten van het experiment zijn weergegeven in Figuur 10. De curve geeft het temperatuurverschil weer tussen de twee referentiesimulaties in het midden van de drinkwaterleiding, op een diepte van 1,08 m. Het temperatuurverschil neemt in de tijd snel af en wordt verwaarloosbaar (ongeveer 0,05 °C) na ongeveer 2.100 uur vanaf de start van de eerste simulatie, overeenkomend met ongeveer 1.300 uur na de start van de tweede simulatie. Deze resultaten geven aan dat een opwarmperiode van ongeveer 1.300 uur voldoende is om de invloed van de initiële temperatuurcondities op de voor deze analyse relevante diepte te elimineren. Alle simulaties die in dit hoofdstuk worden verwerkt met een spin-up van 2000 uur. De spin-up wordt wel in de gepresenteerde data weergegeven.



Figuur 10. “Spin-up” van BTM+.

3.5.2 Referentiemodel zonder elektriciteitskabels

Voordat de kabelconfiguraties uit Bijlage I zijn doorgerekend, is een referentiesituatie zonder elektriciteitskabels vastgesteld: het referentiemodel. Dit model levert de basistemperaturen onder invloed van de bovengrondse omstandigheden zonder de aanwezigheid van kabels. De effecten van de aanleg van kabels zijn verkregen uit de vergelijking van deze situatie met doorgerekende situaties met kabels. Ook het referentiemodel is voor verschillende bodem-, maaiveld- en weersomstandigheden doorgerekend zoals in Paragraaf 3.4 beschreven. Figuur 11 toont de berekende temperaturen op de zeven leidinglocaties op horizontale afstand van elkaar, allemaal op een aanlegdiepte van 1,08 m (zie Paragraaf 3.4.3), voor de zes gevoeligheidsscenario's. De data voor de verschillende leidinglocaties vallen over elkaar heen, wat laat zien dat die locaties bij afwezigheid van kabels identieke omstandigheden ervaren (het draadmodel is groot genoeg om te voorkomen dat randeffecten een rol spelen in de uitkomsten).



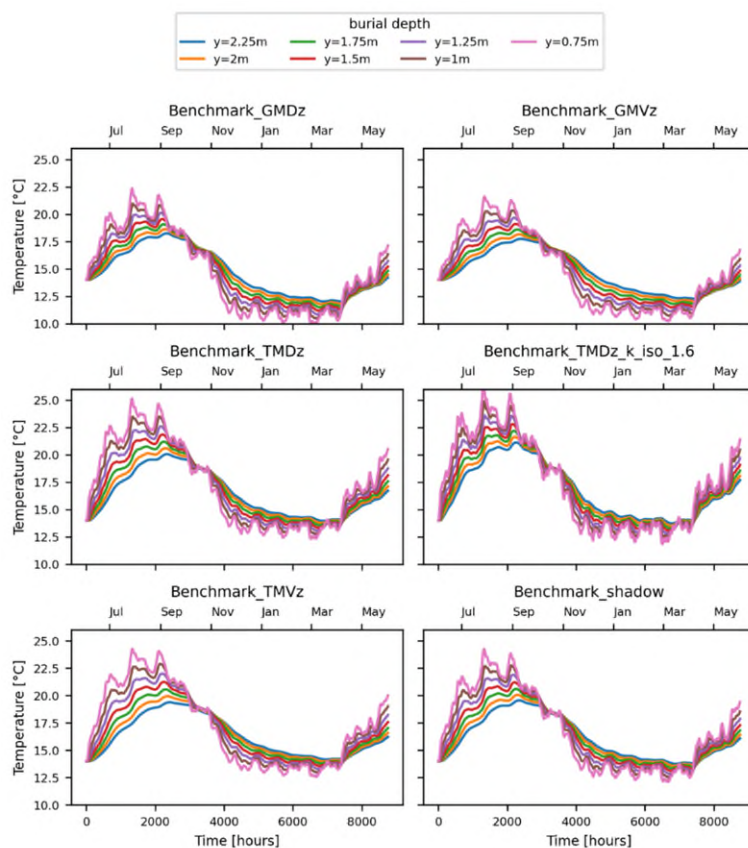
Figuur 11. Uitkomsten voor de 6 gevoeligheidsscenario's op 7 leidinglocaties met dezelfde diepte in het referentiemodel. De curves benoemt in de legende vallen over elkaar heen.

Er zijn verschillen zichtbaar tussen de uitkomsten per gevoeligheidsscenario. Tabel 3 toont de maximaal berekende temperaturen vanaf 2.000 uur (omwille van de spin-up) voor de zes gevoeligheidsscenario's. GMVz geeft wat dat betreft de laagste temperatuur. In de tweede kolom geeft de tabel het verschil in ieder scenario ten opzichte van GMDz. Het verschil tussen nat en droog zand bedraagt ongeveer 0,48 °C voor GMVz ten opzichte van GMDz en ongeveer 0,62 °C voor TMVz ten opzichte van TMDz. Daarentegen resulteert het vervangen van gras door tegels als maaiveldbedekking in een verschil in maximumtemperatuur van ongeveer 2,54 °C. Het effect van schaduw, gerepresenteerd door een hogere albedocoëfficiënt, bedraagt 0,77 °C ten opzichte van TMDz. Het is belangrijk op te merken dat in de praktijk zelfs dezelfde bodemtypen een bandbreedte aan waarden voor de thermische geleidbaarheid kunnen hebben. Het verschil in maximumtemperatuur tussen homogeen droog zand met een thermische geleidbaarheid van 1 W/mK en homogeen nat zand met een geleidbaarheid van 1,6 W/mK is 0,96 °C (TMDz ten opzichte van TMDz_k_iso_1.6). De waarden in Tabel 3 komen overeen met de resultaten gerapporteerd door Van Esch [2022].

Tabel 3. Maximale temperaturen per gevoeligheidsscenario en het verschil van ieder scenario met de uitkomst van GMDz.

Scenario	T_{max} [°C]	ΔT [°C]
GMDz	20,83	0,48
GMVz	20,35	0.00
shaduw	22,75	2,39
TMDz	23,51	3,16
TMDz_k_iso_1.6	24,47	4,12
TMVz	22,89	2,54

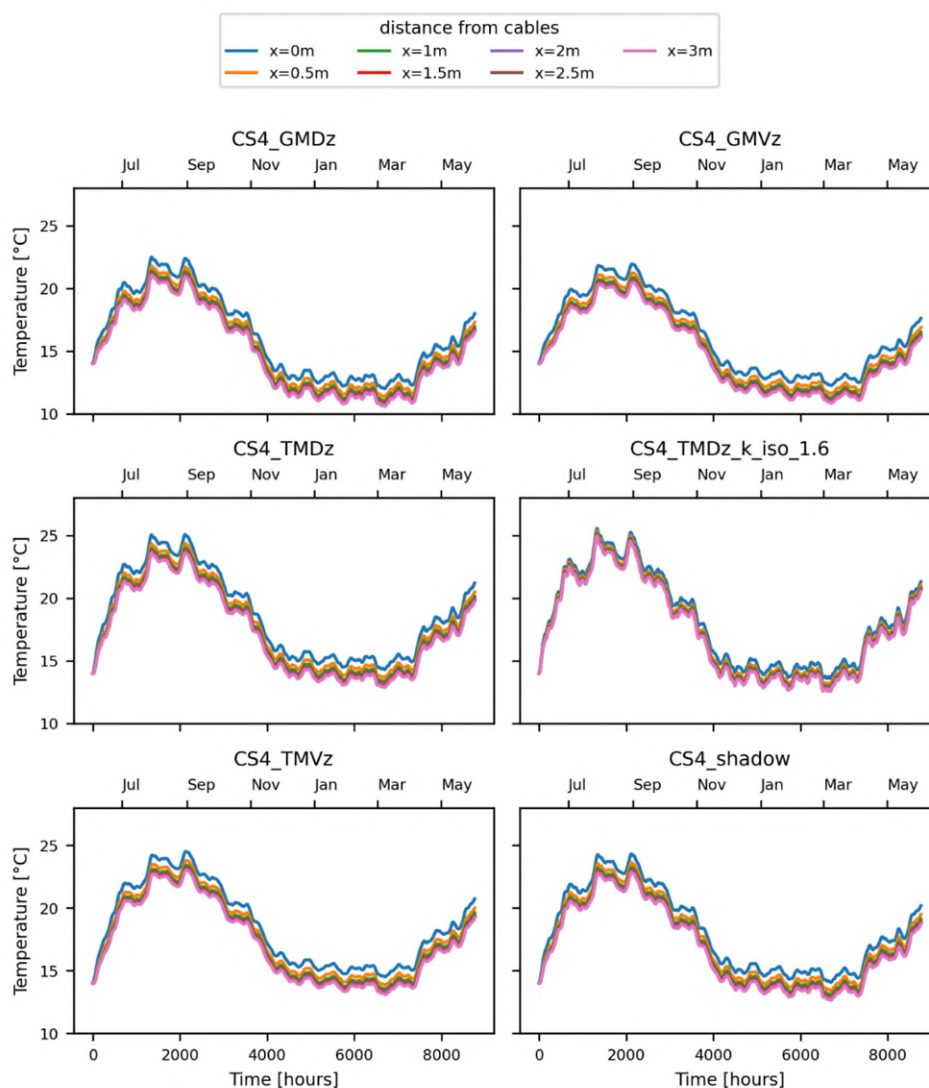
Figuur 12 geeft de berekende temperaturen op de zeven verticale punten in het referentiescenario, dat wil zeggen op verschillende aanlegdiepten, ook zonder aanvullende ondergrondse warmtebron. De aanlegdiepten variëren van 0,75 m tot 2,25 m, met een tussenafstand van 0,25 m. Zoals verwacht bereiken de ondiepste punten de hoogste temperaturen in de zomer en de laagste temperaturen in de winter. Rond oktober en april zijn de temperaturen op alle verticale punten vrijwel gelijk.



Figuur 12. Uitkomsten voor de 6 gevoeligheidsscenario's op 6 leidinglocaties met verschillende diepten in het referentiemodel. De curves benoemt in de legende vallen over elkaar heen.

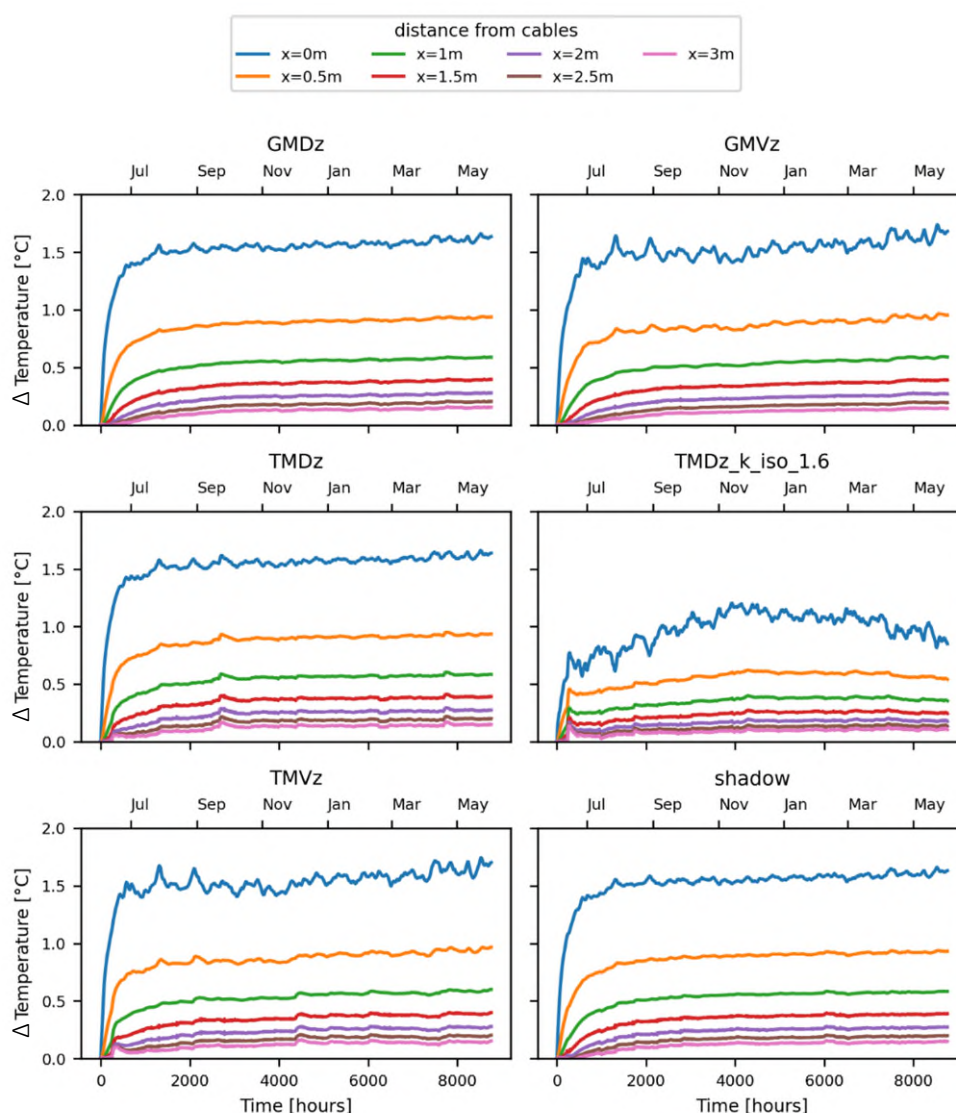
3.5.3 Invloed van kabels onder lage belasting

Voor elk van de vijf KIK is een afzonderlijk BTM+-model in COMSOL opgesteld met een eigen kabelgeometrie en warmtebronnen (zie Bijlage IV). Eerst is er gerekend aan kabels met een aangenomen belasting volgens Paragraaf 3.3.2 (de specifieke waarden staan in Tabel 13 in Bijlage IV). Bij wijze van voorbeeld zijn de ruwe data voor KIK 4 weergegeven in Figuur 13. Iedere curve betreft de verkregen tijdserie van de temperatuur op die leidinglocatie. Figuur 14 geeft een bewerking weer: de tijdserie van het verschil in temperatuur tussen de situatie met kabels op die afstand en het referentiescenario. In deze figuur is het effect van de spin-up aan het begin duidelijk zichtbaar. De temperatuurverhoging door het toedoen van kabels ten opzichte van het referentiemodel is duidelijk zichtbaar en het is zichtbaar dat die temperatuurverhoging afneemt op het moment dat de afstand tot de kabels toeneemt.



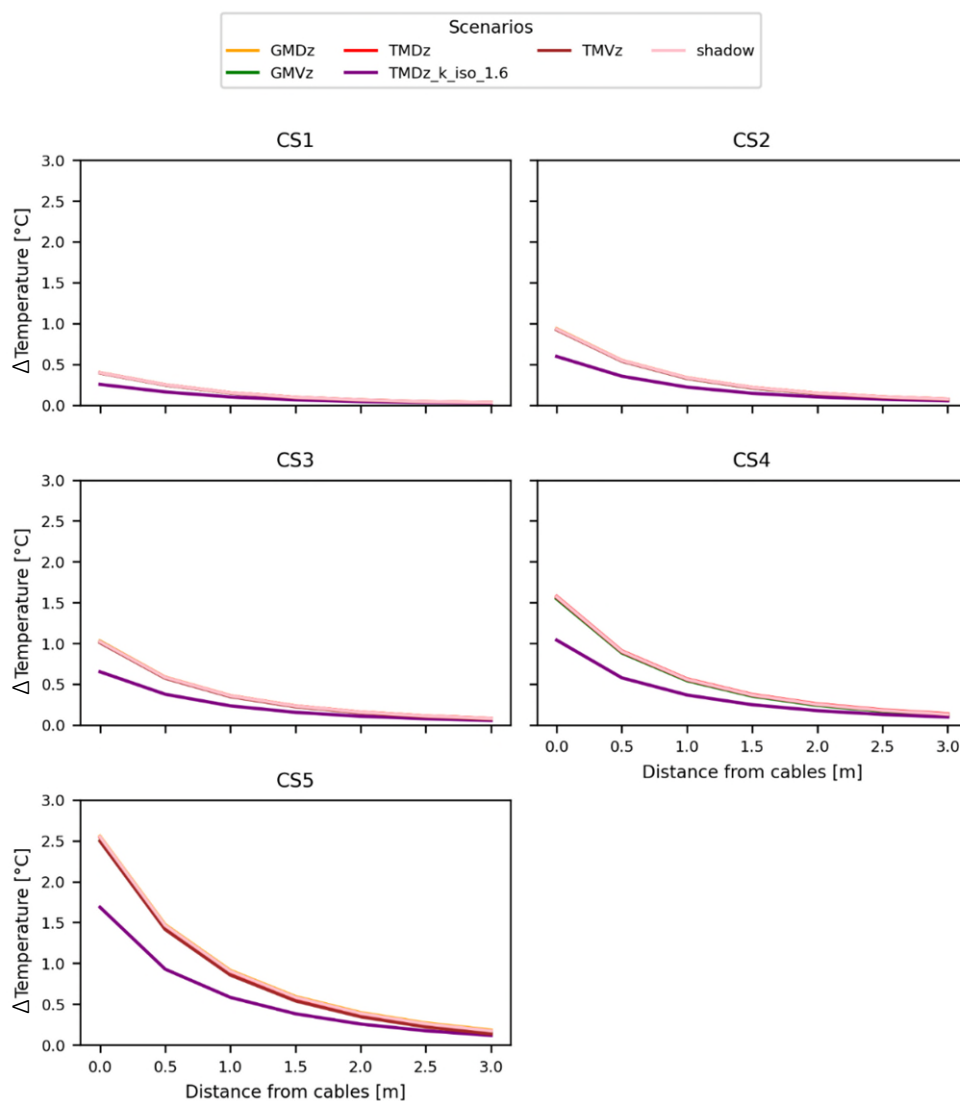
Figuur 13. Temperatuur op 7 verschillende afstanden ten opzichte van de kabels uit KIK 4 voor 6 gevoeligheidsscenario's.

Een belangrijke observatie in Figuur 14 is dat de temperatuurstijging ten opzichte van het referentiemodel na de opwarmperiode van 1.300 uur gedurende het jaar vrijwel constant blijft. Dit patroon wordt voor alle gevoeligheidsscenario's waargenomen. Een andere relevante observatie is dat de berekende temperatuurstijgingen sterk overeenkomen tussen de gevoeligheidsscenario's, met uitzondering van TMDz_k_iso_1.6, waarvoor de stijging iets lager is. Dit is opmerkelijk, omdat de absolute zomertemperaturen het hoogst zijn in het scenario TMDz_k_iso_1.6. Dit komt doordat een hogere thermische geleidbaarheid warmte effectiever door de omliggende bodem verspreidt, waardoor de lokale temperatuurstijging nabij de kabel afneemt, terwijl onder de gekozen maaiveld- en bodemcondities hogere absolute temperaturen kunnen optreden.



Figuur 14. Temperatuurverschil ten opzichte van het referentiescenario op 7 verschillende afstanden ten opzichte van de kabels uit KIK 4 voor 6 gevoeligheidsscenario's.

De strekking van de observaties in Figuur 13 en Figuur 14 komen terug voor alle KIK en alleen de grootte van de temperatuurverhoging verschilt. Figuur 15 vat de temperatuurstijgingen samen voor alle gevoeligheidsscenario's en alle KIK. De figuur laat zien hoe de door kabels veroorzaakte temperatuurverhoging afneemt met de afstand voor elk gevoeligheidsscenario en elke KIK. Elk punt op de curves representeert de gemiddelde temperatuurverhoging gedurende de simulatie vanaf 2000 uur. In Figuur 15 is ook zichtbaar dat de temperatuurverhoging ten opzichte van het referentiemodel vergelijkbaar is tussen de verschillende gevoeligheidsscenario's, met uitzondering van TMDz_k_iso_1.6, waarbij de temperatuurverhoging structureel lager is. Tabel 4 vat de temperatuurverschillen in scenario TMDz ten opzichte van het referentiescenario samen. Deze temperatuurverhogingen vormen een deel van de invoer voor de analyses in Hoofdstuk 5.



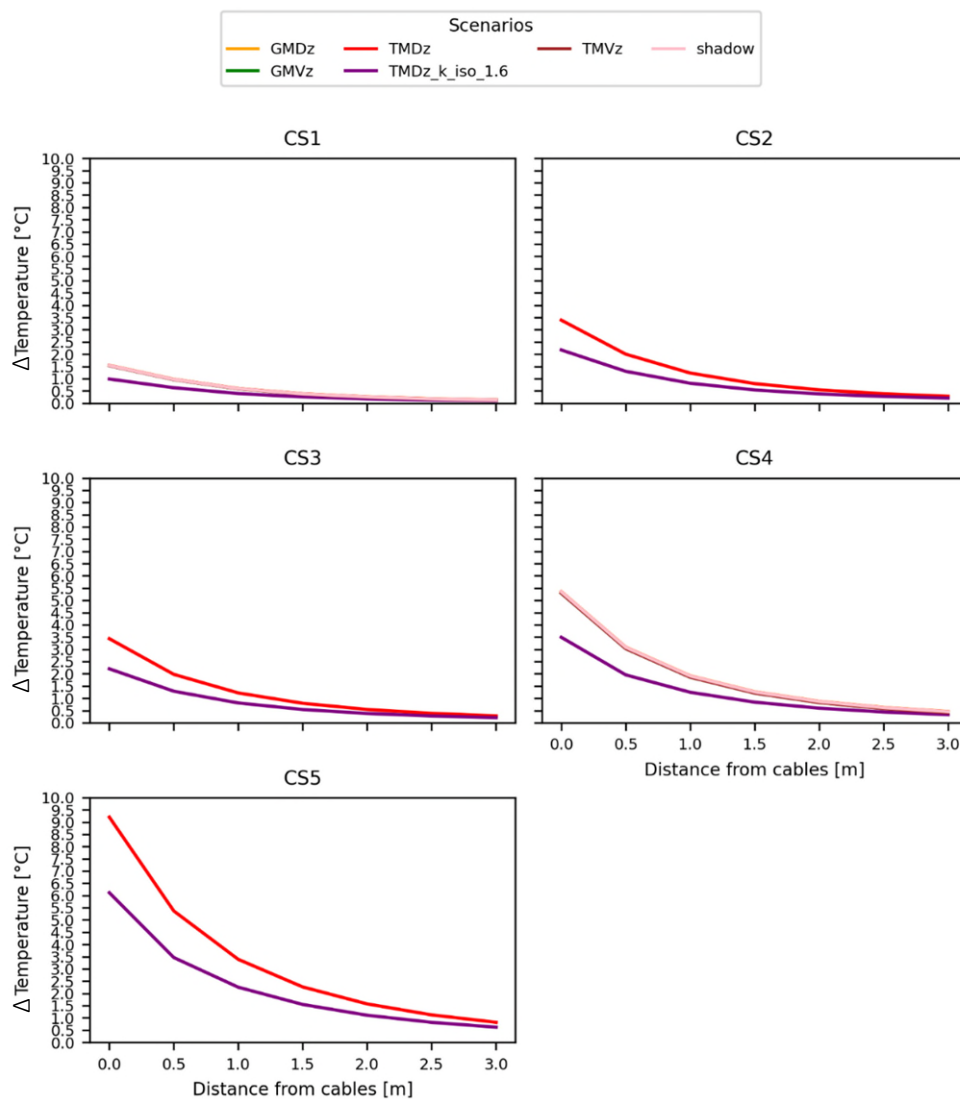
Figuur 15. De gemiddelde temperatuurverhoging door toedoen van laag belaste kabels (volledige belastingsfactor) ten opzichte van het referentiescenario op verschillende afstanden van de kabels in 6 verschillende gevoeligheidsscenario's voor vijf verschillende KIK (CS1 = KIK1, etc.). Alle lijnen behalve TMDz_k_iso_1.6 liggen over elkaar heen.

Tabel 4. Temperatuurverschillen tussen scenario TMDz en het referentiescenario op 7 verschillende afstanden tot vijf verschillende KIK voor kabels met lage belasting (volledige belastingsfactor).

	KIK 1	KIK 2	KIK 3	KIK 4	KIK 5
x=0m	0,40	0,93	1,02	1,58	2,54
x=0,5m	0,25	0,55	0,58	0,91	1,46
x=1m	0,15	0,33	0,36	0,56	0,89
x=1,5m	0,10	0,22	0,23	0,37	0,58
x=2m	0,06	0,15	0,16	0,26	0,38
x=2,5m	0,04	0,10	0,11	0,19	0,25
x=3m	0,03	0,07	0,08	0,14	0,17

3.5.4 Invloed van kabels onder hoge belasting

Er is ook gerekend aan de invloed van kabels met een hoge belasting, zonder de utiliteitsfactor genoemd in Paragraaf 3.3.2 (de specifieke waarden staan in Tabel 14 in Bijlage IV). De data is op dezelfde wijze verwerkt als beschreven in Paragraaf 3.5.3. De samenvatting van de uitkomsten is weergegeven in Figuur 16 en Tabel 5.



Figuur 16. De gemiddelde temperatuurverhoging door toedoen van hoog belaste kabels (geen utilisatiefactor) ten opzichte van het referentiescenario op verschillende afstanden van de kabels in 6 verschillende gevoeligheidsscenario's voor vijf verschillende KIK (CS1 = KIK1, etc.).

Tabel 5. Temperatuurverschillen tussen scenario TMDz en het referentiescenario op 7 verschillende afstanden tot vijf verschillende KIK voor kabels met hoge belasting (geen utilisatiefactor).

	KIK 1	KIK 2	KIK 3	KIK 4	KIK 5
x=0m	1,54	3,39	3,43	5,35	9,20
x=0,5m	0,97	2,00	1,98	3,08	5,37
x=1m	0,59	1,23	1,22	1,91	3,39
x=1,5m	0,38	0,80	0,79	1,26	2,26
x=2m	0,25	0,54	0,54	0,87	1,57
x=2,5m	0,18	0,38	0,38	0,62	1,12
x=3m	0,13	0,28	0,28	0,45	0,82

3.6 Discussie

De hoofduitkomsten van dit hoofdstuk binnen de overkoepelende studie zijn Tabel 4 en Tabel 5, die als invoer zullen dienen voor de analyses van Hoofdstuk 5. Daarnaast zijn Figuur 15 en Figuur 16 bruikbaar om de invloed van verschillende kabelinfrastructuurklassen op de drinkwatertemperatuur bij grootschalige parallelligging af te schatten. Kabelbelasting (wel of geen utiliteitsfactor) speelt de grootste rol in de bijdrage van elektriciteitskabels aan de drinkwatertemperatuur. Bij de interpretatie van de uitkomsten moet rekening gehouden worden met het volgende:

- De afstand tot kabels die in figuurlegenda's en tabellen wordt weergegeven, betreft de horizontale afstand tussen de linkerwand van de drinkwaterleiding en de rechterwand van de dichtstbijzijnde kabel. Naast die horizontale afstand is er echter ook altijd een hoogteverschil tussen kabels en leidingen.
- Zoals toegelicht in Paragraaf 3.2.2 moeten de resultaten die met BTM+ worden verkregen, geïnterpreteerd worden als een theoretische thermische toestand, omdat het model uitgaat van stilstaand water in de drinkwaterleiding en vervolgens de stationaire temperaturen in het systeem berekent. In de praktijk komt deze situatie zelden langdurig voor. De uitkomsten van BTM+ kunnen het best worden beschouwd als de theoretische eindtemperatuur die een waterleiding en de omliggende bodem zouden bereiken nadat zij over een lange afstand parallel aan de elektriciteitskabel lopen. De invloed van microklimaat en elektriciteitskabels op de daadwerkelijke drinkwatertemperatuur onder bedrijfsomstandigheden kan daarom pas volledig worden beoordeeld wanneer stroomsnelheid en verblijftijd in de analyse worden meegenomen (Hoofdstuk 5).
- De temperatuurverhoging die door de elektriciteitskabels wordt veroorzaakt, blijft gedurende het jaar vrijwel constant. Ook de scenario's met betrekking tot bovengrondse bebouwing zorgen niet voor verandering in de bijdrage van de elektriciteitskabels. Wat betreft de modelering van de seizoenen is een beperking dat hierin geen data over het grondwaterpeil is meegenomen. Als kabels en leidingen in het grondwater komen te liggen zal dat invloed hebben op de warmteoverdracht. Afgaande op de resultaten uit gevoeligheidsscenario TMDz_k_iso_1.6 zou de verhoogde thermische geleidbaarheid door het grondwater een kleinere invloed van de elektriciteitskabels tot gevolg hebben. Wat dat betreft is nog een noemenswaardige beperking van deze modelstudie dat BTM+ geen warmteoverdracht door convectorie beschrijft. Verdere invloeden door grondwaterstromen kunnen daarom niet goed beoordeeld worden. Het vermoeden is echter dat grondwaterstroming tot gevolg heeft dat warmte nog beter wordt weggevoerd van het kabel-leidingsysteem en dat de invloed van elektriciteitskabels onder invloed van convectorie verder omlaag zal gaan.

4 Vergelijking tussen veldmetingen en modelberekeningen aan lokale thermische beïnvloeding op een specifieke locatie

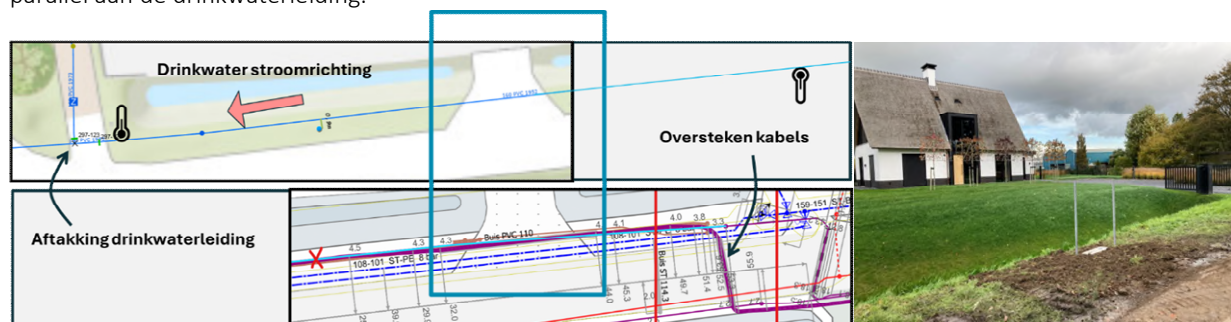
4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft een vergelijking tussen bodemtemperatuurmetingen die zijn verkregen op een specifieke locatie waar leidingen en kabels dicht bij elkaar liggen, en gemodelleerde bodemtemperaturen op basis van een modelmatige reproductie van dezelfde locatie. Het doel is het model te valideren en/of inzicht te krijgen in de afwijkingen ten opzichte van de werkelijkheid die van het model mogen worden verwacht. De casestudielocatie en de verzameling van veldmeetgegevens worden beschreven in Paragraaf 4.2. Relevante aspecten van het model van de casestudielocatie, aanvullend op de algemene modelleringsaanpak die in Hoofdstuk 3 is beschreven, worden beschreven in Paragraaf 4.3. In Paragraaf 4.4 worden de veldmetingen en modeluitkomsten met elkaar vergeleken.

4.2 Metingen op de casestudielocatie

4.2.1 Casestudielocatie

De gekozen casestudielocatie ligt in Poederloijen – waar het drinkwater wordt geleverd door Vitens en de elektriciteit via het netwerk van Alliander wordt geleverd. De locatie betreft een PVC-leiding met een diameter van 160 mm en een XLPE 3x1x630Al-middenspanningskabel die 60 centimeter uit elkaar liggen. Deze locatie wordt al langere tijd door Alliander gebruikt voor de doorlopende verzameling van veldmeetgegevens [Muis et al. 2024]. Figuur 17 toont de meetlocatie zoals zichtbaar in de GIS-systemen van beide nutsbedrijven (het rode kruis markeert de meetlocatie). Het water stroomt van oost naar west. De elektriciteitskabel kruist de weg en loopt vervolgens parallel aan de drinkwaterleiding.



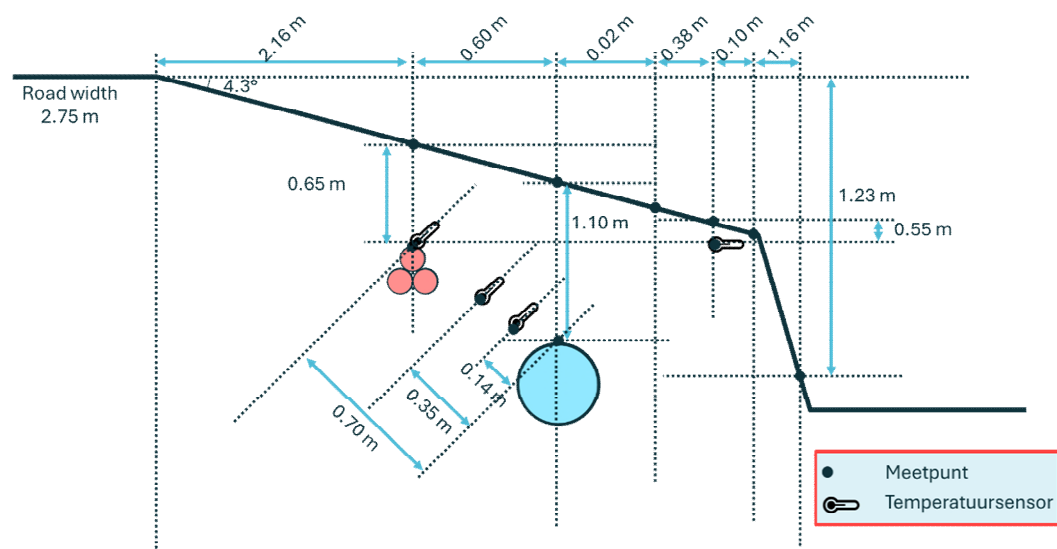
Figuur 17. (links) Casestudielocatie zoals weergegeven in de GIS-systemen van Vitens en Alliander. Het rode kruis markeert de hoofdmeetlocatie (dwarsdoorsnede van Figuur 18). De meetlocatie ligt ongeveer 30 meter stroomafwaarts van de locatie waar de elektriciteitskabel de straat kruist. De thermometers markeren de locatie van de temperatuursensoren. De afstand tussen de temperatuursensoren bedraagt ongeveer 43 m. Het blauwe kader markeert in beide GIS-systemen de oprit van een nabijgelegen woning. (rechts) foto van de locatie bovengronds.

Uit hydraulische modellering door Vitens bleek dat het water van oost naar west stroomt. 's Nachts is er een debiet van ongeveer 0,7 m³/uur en overdag een maximaal debiet van ongeveer 2,3 m³/uur. Dit komt overeen met een verblijftijd van het water in de leiding tussen de sensoren van 25 tot 60 minuten.

4.2.2 Apparatuur en opstelling

Figuur 18 geeft een schematisch overzicht van de casestudiesituatie. Kabel en leiding liggen in de berm langs de weg. De weergegeven punten voor temperatuurmetingen markeren de locatie van vier thermistors die worden aangestuurd door twee standaard 'meettegels' die Alliander gebruikt om de metingen aan te sturen en te registreren [Muis et al., 2024], zoals weergegeven in Figuur 19 (links). Eén van de thermistors is op de kabelmantel geplaatst om de kabeltemperatuur te meten. De andere drie thermistors zijn geplaatst om bodemtemperaturen te meten tussen en op enige afstand van de leiding en de kabel. Deze thermistors kunnen temperatuurveranderingen detecteren met een nauwkeurigheid van 0,5 °C. Voorafgaand aan hun ingebruikname zijn de vier thermistors van de twee meettegels in een emmer met heet water geplaatst, dat vervolgens de tijd kreeg om af te koelen. Tijdens deze tests werd waargenomen dat de signalen van de vier de thermistors in het langzaam afkoelende water identiek waren.

De watertemperatuur werd stroomopwaarts en stroomafwaarts van de dwarsdoorsnede gemeten (zie Figuur 17) met twee SmartProbes (Pipelife), zoals weergegeven in Figuur 19 (rechts). De temperatuursensor in de SmartProbe heeft een opgegeven nauwkeurigheid van 0,01 °C. Alle sensoren voor bodem- en watertemperatuurmetingen zijn nieuw geïnstalleerd op 28 oktober 2025. Tijdens de installatie werd geen grondwater aangetroffen. De dataverzameling voor validatie is gestart na 1 maart 2026, zodat er voldoende tijd was voor de ontwikkeling van representatieve bodemtemperatuurprofielen na de aanzienlijke verstoring van de bodem tijdens de installatie van de sensoren.



Figuur 18. Dwarsdoorsnede van de casestudielocatie loodrecht op de waterstroom (niet op schaal).

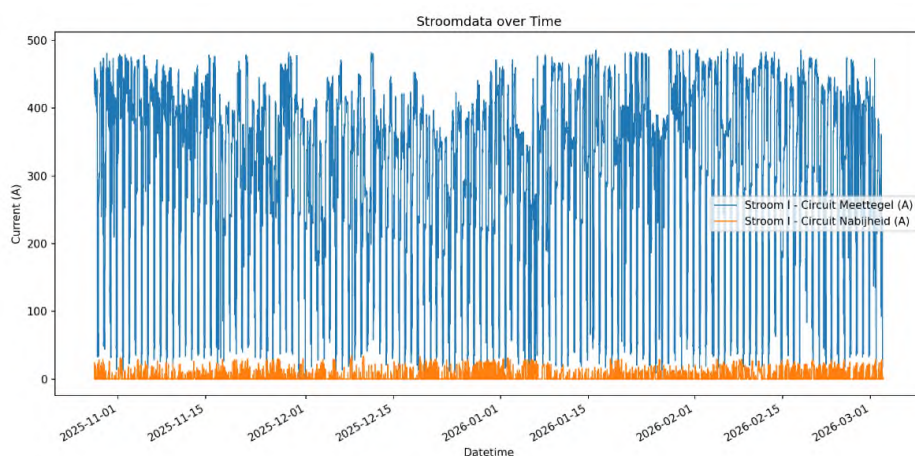


Figuur 19. (links) Thermistors voor bodemtemperatuurmetingen, aangestuurd door een 'meettegel'. (rechts) Geïnstalleerde Smart probe voor watertemperatuurmetingen.

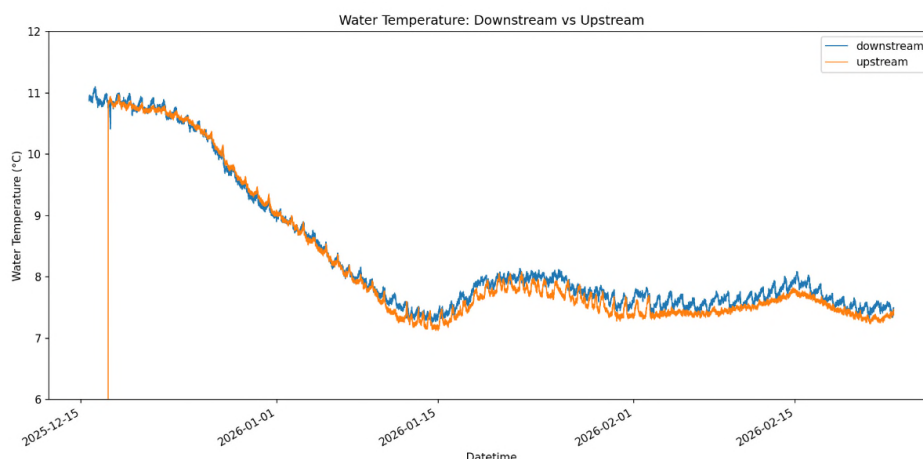
4.2.3 Verkregen meetdata

Tijdens de veldmetingen zijn drie typen data verzameld, namelijk:

- Metingen van de elektrische stroom in de kabels. De stroommetingen zijn verzameld in de periode van 28 oktober 2025 tot en met 3 maart 2026. De ruwe meetgegevens zijn weergegeven in Figuur 20. De meetfrequentie bedraagt 5 minuten. De maximale stroom is ongeveer 480 A. Dat is ongeveer 70% van de ampaciteit (maximaal toelaatbare stroom). Deze uitzonderlijk hoge belasting komt door de functie van de kabel (een niet-redundante aansluiting van één industriële klant) en behoort op het moment van schrijven tot de 2% hoogst belaste kabels van Alliander.
- Metingen van de bodemtemperatuur. De bodemtemperatuurmetingen zijn uitgevoerd gedurende dezelfde periode als de stroommetingen. De meetgegevens zijn verderop zichtbaar in Figuur 24. De temperatuurdata heeft geen vaste frequentie; de dataloggers registreerden telkens wanneer de temperatuur met ten minste 0,5 °C veranderde.
- Metingen van de watertemperatuur. De watertemperatuur is gemeten stroomopwaarts en stroomafwaarts van de doorsnede waar ook de bodemtemperatuur is gemeten. De watertemperatuurmetingen zijn geregistreerd in de periode van 15 december 2025 tot en met 23 februari 2026. De ruwe meetgegevens zijn weergegeven in Figuur 21. Zoals uit de figuur blijkt, functioneerde de stroomopwaarts geplaatste temperatuurlogger pas vanaf de derde meetdag naar behoren. De meetfrequentie van de watertemperatuurmetingen bedroeg 5 minuten. Vanaf ongeveer 8 januari is te zien dat het water in de 25-60 minuten verblijftijd tussen het punt bovenstrooms en benedenstrooms enigszins opwarmt. Ook is een zaagtandpatroon te zien in de individuele tijdseries; dit kan te maken hebben met de variatie in stroomsnelheid van het water (meer opwarming bij lage snelheden) of bij omstandigheden nog verder bovenstrooms. Om daar uitspraken over te kunnen doen zouden toegespitste debietmetingen op de casestudielocatie uitgevoerd moeten worden.



Figuur 20. Gemeten belasting in de MV-kabel (blauw) en de LV-kabel (oranje).



Figuur 21. Gemeten drinkwatertemperatuur, bovenstrooms (oranje) en benedenstrooms (blauw) van de bodemtemperatuurmetingen.

De metingen van de elektrische stroom en de watertemperatuur zijn gebruikt als invoer, oftewel randvoorwaarden, voor het model. De elektrische stroom is niet rechtstreeks als invoer gebruikt; in plaats daarvan zijn de stroommetingen gebruikt om de warmteverliezen van de kabels te bepalen, die vervolgens als invoer voor het model dienen (zie Paragraaf 4.3.3). De bodemtemperatuurmetingen zijn gebruikt voor de vergelijking met de modeluitkomsten.

4.3 Model van de casestudielocatie

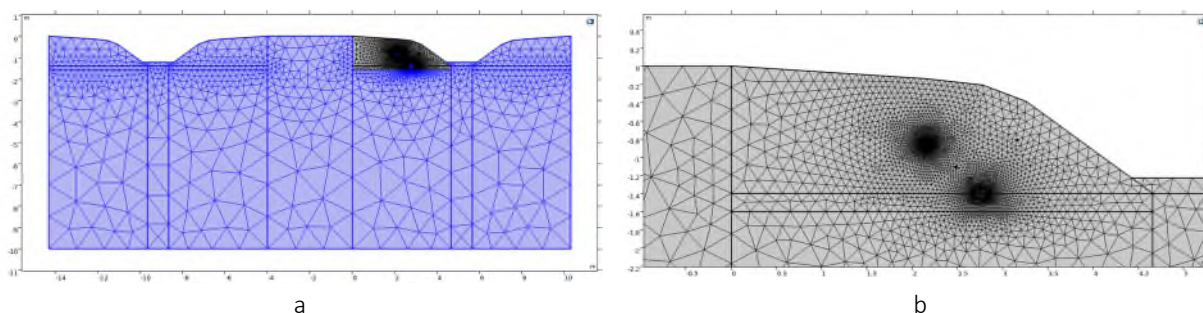
Deze sectie beschrijft de belangrijkste aspecten van het model dat voor de vergelijking is gebruikt, in aanvulling op die aspecten die al in Hoofdstuk 3 zijn beschreven.

4.3.1 Geometrie

De modelgeometrie is gebaseerd op de afmetingen die zijn opgenomen in Figuur 18. Naast de geometrie in de directe omgeving van de drinkwaterleiding en elektriciteitskabels die in Figuur 18 zijn weergegeven, was het ook noodzakelijk om de geometrie van de omliggende omgeving te definiëren om te komen tot de juiste thermisch isolerende randvoorwaarden (zie ook Paragraaf 3.4.3). Omdat de bredere omgeving niet is ingemeten tijdens de installatie van de meetapparatuur, zijn verschillende afmetingen die nodig waren voor de modelontwikkeling geschat met behulp van Google Maps. Deze schattingen omvatten:

- de breedte en diepte van de sloot waaraan de kabels en de drinkwaterleiding zich bevinden;
- de geometrie van de tegenoverliggende sloot, waarvan werd aangenomen dat deze vergelijkbare afmetingen heeft als de eerste oever;
- de breedte van de aangrenzende weg.

De geometrie van het volledige modeldomein, samen met een gedetailleerde weergave van het gebied rondom de elektriciteitskabels en de drinkwaterleiding, is weergegeven in Figuur 22. Het draadmodel (*mesh*) is niet uniform over het gehele modeldomein. Vergelijkbaar met de aanpak die is toegepast in Hoofdstuk 3, is verfijning toegepast in de nabijheid van de meetlocaties om de nauwkeurigheid van de berekende temperaturen te vergroten. Rond de meetpunten is de instelling “extremely fine” gebruikt, terwijl in de overige delen van het model de instelling “normaal” is toegepast om de rekentijd te beperken.



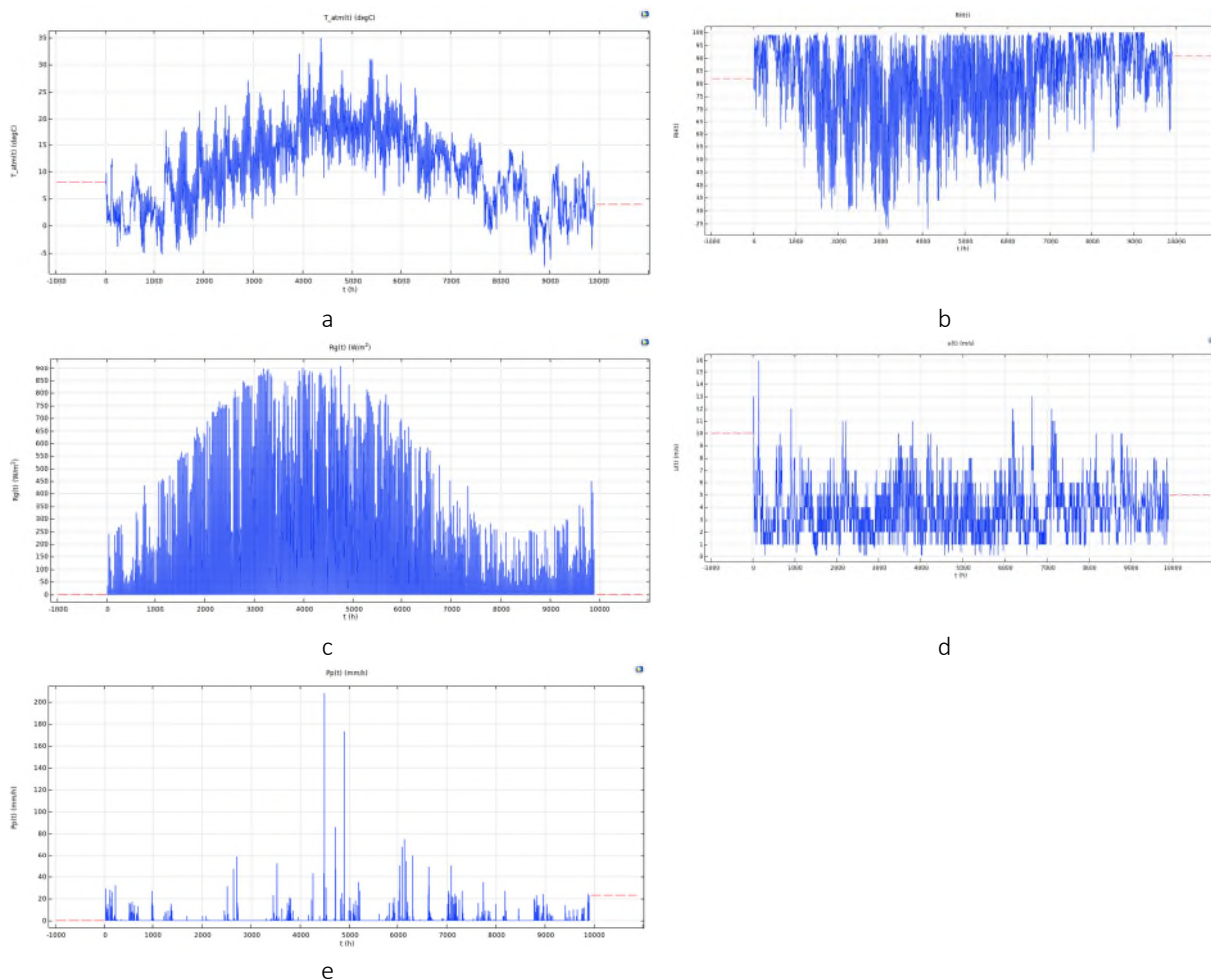
Figuur 22. Bodemtemperatuurmodel voor de casestudie a) geheel; en b) uitvergroting van het deel met kabels en leidingen.

4.3.2 Weergegevens

Zoals toegelicht in Hoofdstuk 3 gebruikt het model luchttemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, globale straling, windsnelheid en neerslag als meteorologische invoergegevens. In tegenstelling tot de analyses die in Hoofdstuk 3 zijn gepresenteerd, waarbij gegevens van weerstation De Bilt zijn gebruikt, maakte de casestudie gebruik van gegevens van het KNMI-station dat het dichtst bij de meetlocatie ligt: Herwijnen (station-ID 356), ca. 5 km verderop.

Weergegevens op uurbasis voor de periode van 1 januari 2025 tot en met 17 februari 2026 zijn gedownload uit de KNMI-database. De volledige dataset bevat ongeveer 10.000 uurlijkse waarnemingen. De einddatum werd gekozen

in overeenstemming met de periode van metingen aan de kabelbelasting en de watertemperatuur. De startdatum werd gekozen om een voldoende lange opwarmperiode (spin-up) voor het model te creëren en daarmee de invloed van de initiële condities te minimaliseren. Deze aanpak doet mogelijk geen recht aan de werkelijke situatie, gezien de bodemroering tijdens de installatie van de temperatuursensoren. De weergegevens die in de analyse zijn gebruikt, zijn weergegeven in Figuur 23.



Figuur 23. Gebruikte KNMI-data uit station Herwijnen voor de periode 1 Januari 2025 tot en met 17 Februari 2026. a) atmosferische temperatuur; b) relatieve luchtvochtigheid, c) instraling met korte golflengte, d) windsnelheid, e) neerslag.

4.3.3 Bodemeigenschappen

De thermische eigenschappen van de bodem beïnvloeden de resultaten van de modelberekeningen, met name de warmtegeleidingscoëfficiënt (of omgekeerd de warmteresistiviteit, aangeduid als G-waarde). Voor de casestudielocatie zijn lokale G-waarden beschikbaar uit laboratoriumanalyses uitgevoerd door Alliander (Alliander, 2025). In het door Alliander verstrekte document worden G-waarden (warmteresistiviteiten) gegeven voor zowel minimaal als maximaal verdichte bodemonsters. De gerapporteerde G-waarden voor deze twee monsters bedragen respectievelijk 1,01 mK/W en 0,56 mK/W. Voor de in dit hoofdstuk gepresenteerde berekeningen is gebruikgemaakt van de G-waarde van 1,01 mK/W, behorend bij het minimaal verdichte bodemonster.

4.3.4 Thermische verliezen van de kabels

Op de casestudielocatie zijn twee elektriciteitskabels aanwezig: een laagspanningskabel en een middenspanningskabel. Omdat de gemeten stroom in de laagspanningskabel zeer klein was, werd de thermische invloed ervan verwaarloosbaar geacht en niet in het model opgenomen. De gemeten stroom in de middenspanningskabel, weergegeven in Figuur 20, is omgerekend naar een warmtestroom volgens de

methodologie beschreven in Paragraaf 3.3. Hiervoor is een door DNV ontwikkeld MATLAB-script gebruikt om de door de kabel geproduceerde warmte te berekenen op basis van de gemeten belasting. Omdat deze keer een tijdserie van de belasting beschikbaar was, werd de warmteproductie van de kabel voor elke tijdstap bepaald op basis van de overeenkomstige gemeten stroomwaarden en een quasi-stationaire benadering. Bij deze benadering worden de kabelverliezen berekend door het stationaire model te evalueren met de momentane stroomsterkte van elke tijdstap. Daardoor varieert de warmteproductie in de tijd als reactie op veranderingen in het gemeten stroomprofiel. De thermische capaciteit van de verschillende kabellagen wordt hierbij echter niet meegenomen. Dit betekent dat warmteopslag binnen de kabels wordt verwaarloosd en dat elke tijdstap onafhankelijk wordt behandeld als een stationaire situatie. De temperaturen van de hoofdgeleiders zijn conservatief aangenomen, gelijk aan de maximaal toegestane bedrijfstemperatuur van het betreffende kabeltype.

4.3.5 Watertemperatuur in het model

Metingen van de drinkwatertemperatuur stroomopwaarts van de hoofdlocatie (Figuur 17) zijn gebruikt als invoer voor het model. Deze temperaturen zijn toegepast als een vaste temperatuur-randvoorwaarde aan de binnenwand van de drinkwaterleiding. Het opnemen van deze randvoorwaarde vormt het enige conceptuele verschil tussen het model dat voor de casestudie is gebruikt ten opzichte van de aanpak in Hoofdstuk 3. De thermische invloed van het water in de leiding blijft doorgaans beperkt tot de directe omgeving van de leiding en wordt daarom vaak verwaarloosd in scenarioanalyses. Wanneer er gemeten watertemperaturen beschikbaar zijn, echter, kan deze randvoorwaarde worden meegenomen om de overeenstemming tussen modelvoorspellingen en veldwaarnemingen te verbeteren.

4.4 Vergelijking tussen metingen en model

Hier worden de modelresultaten vergeleken met temperatuurmetingen van de vier thermistors die zijn geïnstalleerd nabij de middenspanningskabel en de drinkwaterleiding. Figuur 24 toont zowel de met het BTM+ berekende temperaturen (doorgetrokken lijnen) als de gemeten temperaturen (gestreepte lijnen). Temperaturen die behoren tot dezelfde sensorpositie zijn weergegeven met dezelfde kleur. De vergelijking beslaat de periode van 1 januari 2026 tot en met 17 februari 2026. De datasets die in Figuur 24 worden gepresenteerd, komen overeen met de volgende meetlocaties:

- T_cable – thermistor geïnstalleerd op de kabelmantel om de kabeltemperatuur te meten;
- T_between_35cm – thermistor geïnstalleerd tussen de kabel en de drinkwaterleiding, op ongeveer 35 cm afstand van de leiding;
- T_between_14cm – thermistor geïnstalleerd tussen de kabel en de drinkwaterleiding, op ongeveer 14 cm afstand van de leiding;
- T_100cm – thermistor geïnstalleerd op ongeveer 100 cm afstand van de middenspanningskabel.

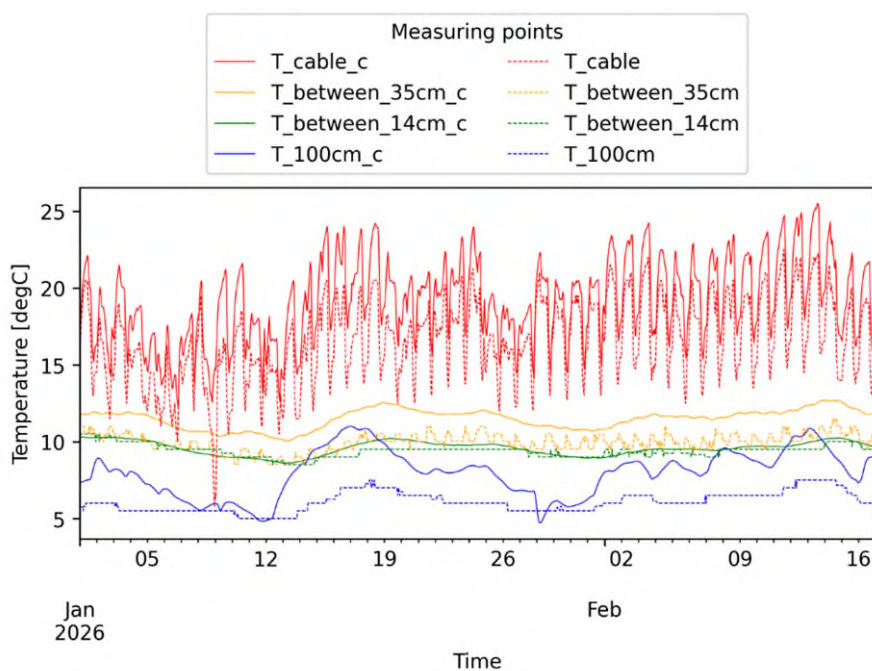
Datasets met het achtervoegsel "_c" vertegenwoordigen de door het model berekende temperaturen.

De verschillen tussen de gemodelleerde en gemeten temperaturen zijn weergegeven in Figuur 25. De minimale, maximale en gemiddelde afwijkingen zijn opgenomen in Tabel 6. De omvang van de afwijkingen verschilt per meetlocatie.

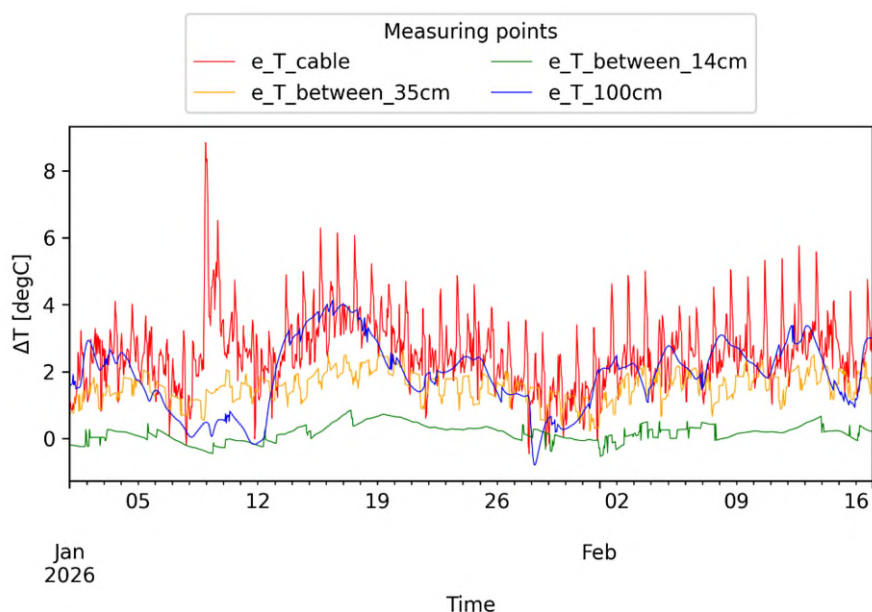
De grootste afwijkingen worden waargenomen bij T_cable, terwijl de kleinste afwijkingen optreden bij T_between_14cm. Hoewel de grootste fouten samenhangen met T_cable, laat Figuur 24 zien dat het temporele gedrag van de gemodelleerde en gemeten temperaturen op deze locatie sterk overeenkomt. Met andere woorden: beide datasets vertonen vrijwel identieke temperatuurpatronen (wat betreft pieken en dalen) en reageren op vergelijkbare wijze op veranderingen in de omgevingsomstandigheden en de kabelbelasting. Dit suggereert dat de afwijking wordt veroorzaakt door een systematische fout in de schatting van de kabeltemperatuur op basis van de kabelbelastinggegevens, of door een fout in de aangenomen kabeleigenschappen, en niet door tekortkomingen in

het warmtetransportmodel zelf. De aangenomen maximale geleidertemperatuur en de bijbehorende weerstand van de geleider spelen daar waarschijnlijk een grote rol in.

De vergelijking tussen model en metingen voor $T_{\text{between_35cm}}$ laat een ander beeld zien. De meetgegevens vertonen hier nog steeds een dagelijks patroon dat overeenkomt met de temperatuurvariaties van de kabel, terwijl het model voorspelt dat dit patroon al is uitgevlakt tot een vrijwel glad verloop. Dit suggereert dat de geschatte bodemwarmtegeleidingscoëfficiënt leidt tot een onderschatting van de werkelijke warmtegeleiding in de bodem. Desondanks verdwijnt het dagelijkse patroon in de meetgegevens bij $T_{\text{between_14cm}}$. Dit betekent dat de dagelijkse variaties in de thermische invloed uiteindelijk inderdaad uitsmoort, wat de modelkeuze bevestigt om te werken met een equivalente constante kabelbelasting.



Figuur 24. Berekende (doorgetrokken) en gemeten (stippellijnen) temperaturen voor de vier sensorlocaties uit Figuur 18.



Figuur 25. Verschil tussen model (doorgetrokken lijn Figuur 24) en meting (stippellijn Figuur 24) voor de vier sensorlocaties uit Figuur 18.

Tabel 6. Min, mean and max discrepancies between the model and the measurements at four measuring points

	min	mean	max
T_cable	0,01	2,56	8,84
T_between_35cm	0,22	1,56	2,63
T_between_14cm	0,00	0,17	0,84
T_100cm	0,00	1,90	4,12

Naast de onzekerheden in de bodemeigenschappen en het overschatten van de vooraf berekende thermische uitstraling door de kabels kunnen andere factoren ook bijdragen aan de verschillen tussen de modelvoorspellingen en de veldmetingen. De volgende factoren worden van minder groot belang geacht maar kunnen niet worden uitgesloten:

- aannames die moesten worden gedaan met betrekking tot de elektrische stroomsterkte en de drinkwatertemperatuur vóór de start van de meetcampagne, die van invloed zijn op de opwarmfase (warm-up) van het model;
- afwijkingen en onzekerheden in de invoergegevens en aannames die voortkomen uit de complexiteit van de meetlocatie, zoals:
 - najleffecten van de recente graafwerkzaamheden, die de thermische eigenschappen en verdichting van de omliggende bodem kunnen hebben beïnvloed;
 - de exacte locatie van de meetpunten;
 - de aanwezigheid van een nabijgelegen afvalwaterleiding die niet in het model is opgenomen;
 - onzekerheid over de lokale grondwaterstand en grondwaterstroming;
 - onzekerheid over het werkelijke waterverbruik in vergelijking met het veronderstelde stromingspatroon dat is gebruikt in de modellen van Vitens.

Maatregelen om rekening te houden met deze factoren zouden zeer arbeidsintensief zijn. Zij zouden onder meer de installatie van debietmeters, veel uitgebreidere bodemanalyses, actieve monitoring van grondwaterstanden en een veel intensiever meetprogramma vereisen. Daarnaast zou het kiezen van een minder complexe locatie (zowel wat betreft de aanwezige infrastructuur als wat betreft de geometrie van het landschap) eveneens voordelen bieden.

Ondanks deze onzekerheden en afwijkingen laten de resultaten zien dat het BTM+ zowel de orde van grootte als de temporele dynamiek van de gemeten temperaturen met een redelijke nauwkeurigheid kan reproduceren.

5 Stadsbrede analyse van de invloed van kabels op de drinkwatertemperatuur

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de thermische invloed van elektriciteitskabels op de drinkwatertemperatuur beoordeeld met behulp van een stadsbrede modelaanpak. Er wordt een watertemperatuurmodel toegepast op het drinkwaterdistributienet van Almere, waarbij informatie over kabelbelasting en de ruimtelijke aanwezigheid van kabelinfrastructuur wordt meegenomen via een reeks scenario's. De analyses geven inzicht in de manier waarop verschillende afstanden tussen kabels en leidingen en verschillende infrastructuurconfiguraties de drinkwatertemperatuur in het gehele leidingnet beïnvloeden. Paragraaf 5.2 beschrijft de opzet van de modelaanpak, Paragraaf 5.3 beschrijft de verschillende stadsbrede scenario's die zijn vergeleken en Paragraaf 5.4 beschrijft de uitkomsten van de modellering.

5.2 Modelaanpak

5.2.1 Algemene beschrijving van WTM+

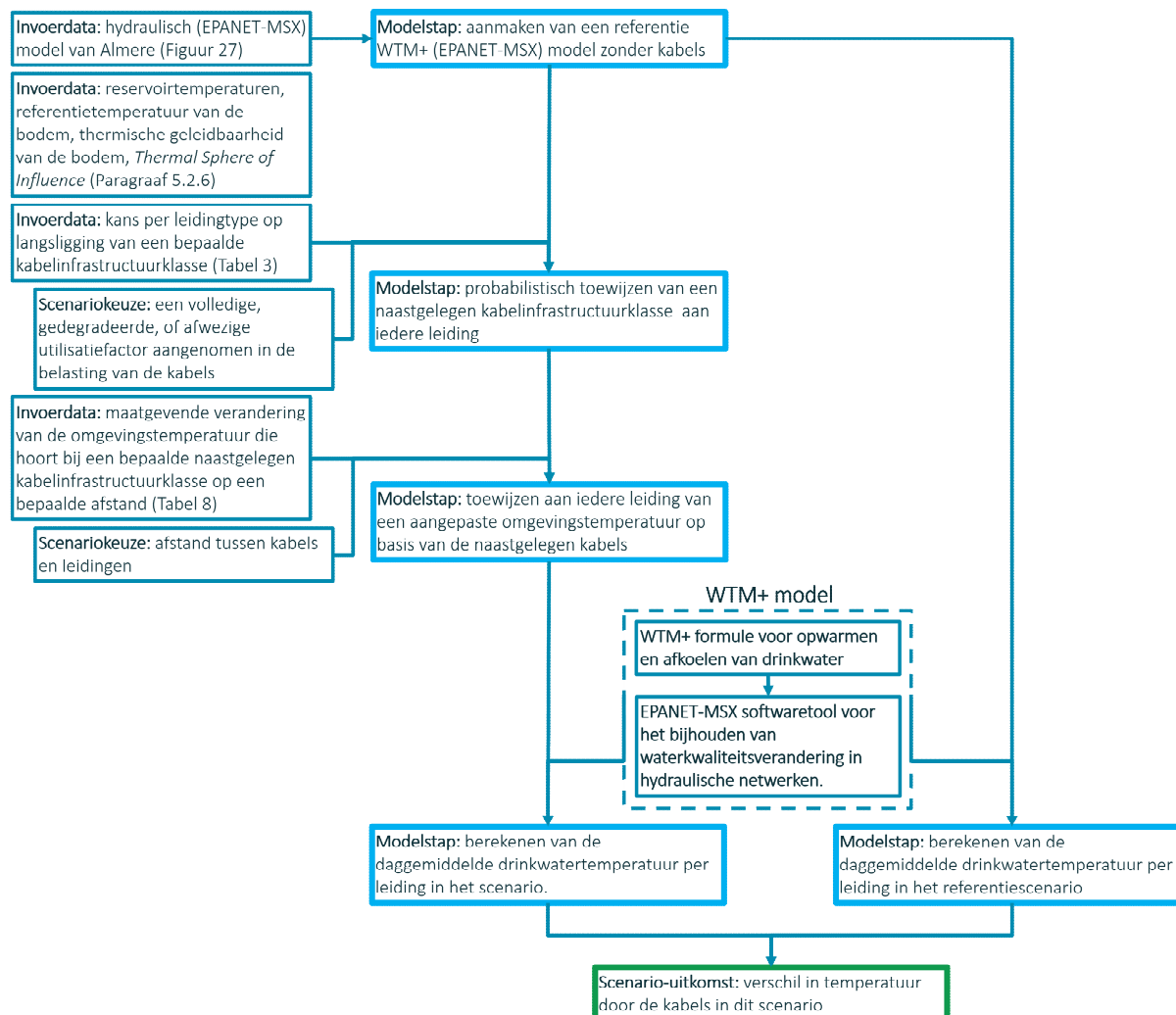
De stadsbrede analyse is uitgevoerd met het Water Temperatuur Model (WTM+), ontwikkeld door KWR en geïmplementeerd in de EPANET Multi-Species Extension (EPANET-MSX). De kern van het model wordt gevormd door het hydraulische EPANET-model, dat de waterstroming en het transport van water door het drinkwaterdistributienet simuleert [Rossman, 2000]. EPANET-MSX breidt het EPANET-raamwerk uit door het transport en de reactie van meerdere waterkwaliteitscomponenten binnen het hydraulische netwerk mogelijk te maken [Shang en Uber, 2008]. In WTM+ wordt de functionaliteit van EPANET-MSX voor het volgen van waterkwaliteit gebruikt om, met behulp van warmteoverdrachtsvergelijkingen, de watertemperatuur te simuleren in plaats van een chemische component [Blokker en Quirijns, 2013]. Deze vergelijkingen combineren de thermische eigenschappen van de drinkwaterleiding en de omgeving ervan tot een netto warmte-uitwisseling tussen het water en de omgeving. Terwijl het water door het netwerk stroomt, wisselt het water warmte uit met de omringende omgeving. Deze warmte-uitwisseling wordt weergegeven met randvoorwaarden die op elke afzonderlijke leiding worden toegepast.

De belangrijkste parameters van WTM+ zijn onder meer de leidingdiameter, het leidingmateriaal, de wanddikte, het bodemmateriaal, de $TSol^2$ en de representatieve temperatuur op enige afstand van de leidingwand ($T_{boundary}$). De leidingdiameter is rechtstreeks als leidingeigenschap opgenomen in het hydraulische model, terwijl de overige parameters deel uitmaken van de definitie van de temperatuurrandvoorwaarde die via de MSX-module op elke afzonderlijke leiding in het model wordt toegepast. In combinatie met informatie over de waterstroming uit de hydraulische simulaties bepalen deze parameters de verandering van de watertemperatuur langs elk leidingsegment. Een gedetailleerde beschrijving van het WTM+-model en de bijbehorende basisvergelijkingen is te vinden in [Blokker et al., 2024].

² *Thermal Sphere of Influence*, de lengteschaal die wordt gebruikt om de omvang van temperatuurgradienten in de bodem rond een buis op versimpelde wijze te beschrijven.

5.2.2 WTM+ workflow en de structuur van een stadsbrede berekening

Elke stadsbrede simulatie in WTM+ wordt opgebouwd door verschillende invoercomponenten te combineren die samen de warmte-uitwisselingscondities voor elke leiding in het drinkwaternet definiëren. De volledige methodiek is weergegeven in Figuur 26. De belangrijkste tussenstappen zijn beschreven in de opvolgende paragrafen.



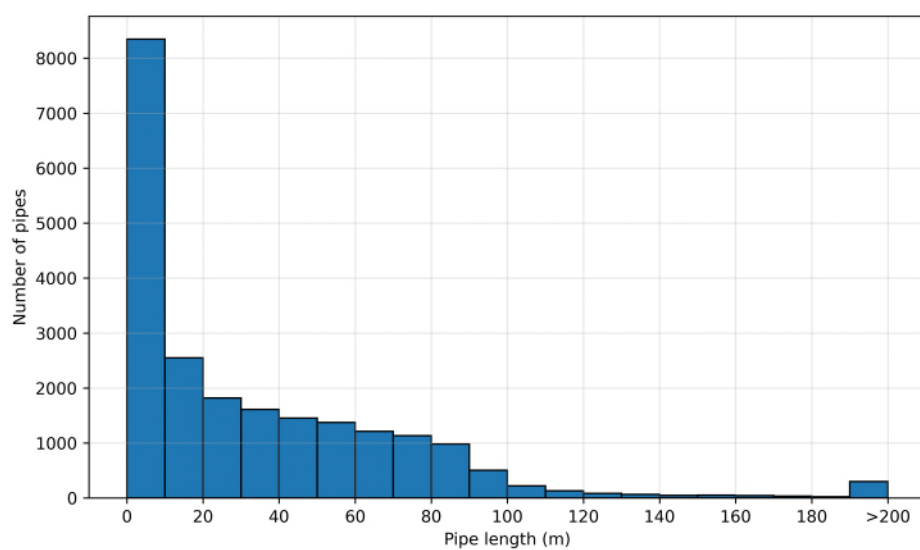
Figuur 26. Workflow voor WTM+.

5.2.3 Hydraulisch model

De eerste set invoergegevens is het hydraulische netwerkmodel, dat de fysieke opbouw van het distributiesysteem van Almere beschrijft (Figuur 27), inclusief alle leidingen (leiding-ID's, lengte, diameter, enz.), knooppunten, reservoirs en watervraag. Dit model bepaalt de hydraulische omstandigheden waaronder het water door het netwerk stroomt. Figuur 28 toont de verdeling van leidinglengten in het drinkwaterdistributienet van Almere. Het netwerk wordt gekenmerkt door veel relatief korte leidingen, waarbij de meeste leidingen korter zijn dan ongeveer 50 meter. Het aantal leidingen neemt af naarmate de leidinglengte toeneemt, terwijl slechts een klein aantal leidingen langer is dan 200 meter. Over de gehele lengte van één segment geldt dezelfde randvoorwaarde qua omgevingstemperatuur. De berekende tijd in de simulaties betreft een periode van 72 uur met een hydraulische en waterkwaliteits-tijdstap van één minuut. Gedurende deze periode volgde de watervraag een repeterend 24-uursvraagpatroon dat overeenkomt met het patroon van een gemiddelde dag. Het water stroomde het netwerk binnen via twee toevoerlocaties met temperaturen van respectievelijk 15 °C (noordelijke locatie) en 14 °C (zuidelijke locatie). De resultaten werden elke 15 minuten gerapporteerd. Voor de analyse zijn uitsluitend de laatste 24 uur van de simulatie gebruikt, zodat de invloed van initialisatie-effecten werd uitgesloten.



Figuur 27. Leidingnetmodel van Almere. De blauwe vierkanten zijn de leverpunten.



Figuur 28. Histogram van leidinglengten in het netwerkmodel van Almere.

5.2.4 Kabeldichtheid

De tweede set invoergegevens is de kabeldichtheidstabel (Tabel 7). Deze tabel bevat voor elke leidingdiameterklasse het percentage drinkwaterleidingen dat zich in de nabijheid van verschillende typen elektriciteitskabels bevindt. Deze percentages komen overeen met de huidige situatie in Almere en zijn afgeleid uit een GIS-analyse die door Alliander is aangeleverd. De percentages beschrijven hoe vaak elk kabeltype voorkomt in de nabijheid van drinkwaterleidingen. Variaties op deze specifieke combinatie van percentages zijn toegepast in de vorm van kabeldichtheidsscenario's (zie Paragraaf 5.3.2).

Tabel 7. Baseline kabeldichtheidsverdeling voor de stadsbrede analyse.

Scenario	Pipe D (mm)	LV and light MV	LV and light MV no utilization factor	Heavy MV	Heavy MV no utilization factor	Substation
Baseline utilization factor	All	91.95% (70% LV+ 21.95% light MV)	0	8.04%	0	0.01%
	<150	65.08	0	5.02	0	0
	150-250	15.72	0	1.04	0	0
	>250	11.15	0	1.98	0	0.01

5.2.5 Omgevingstemperatuur

De derde set invoergegevens is de tabel met externe temperatuurverschillen ($\Delta T_{\text{boundary}}$) (Tabel 8). Deze tabel bevat de externe temperatuurverhoging onder invloed van opwarming door elektriciteitskabels voor drie kabelklassen, twee verschillende niveaus van utiliteitsfactor en zeven mogelijke afstanden tussen leiding en kabel. De $\Delta T_{\text{boundary}}$ -waarden zijn afgeleid uit de analyse die is beschreven in Hoofdstuk 3. De beschouwde afstanden tussen kabel en leiding zijn 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 en 3,0 m. De beschouwde kabeltypen zijn (zie ook Paragraaf 2.3):

- Lichte kabelinfrastructuur: laagspanningskabels (LV) of de lichtste klasse middenspanningskabels (MV), vertegenwoordigd door KIK 1;
- Zware kabelinfrastructuur: zwaardere klassen middenspanningskabels (MV), vertegenwoordigd door KIK 4;
- Transformatorstation-infrastructuur: de situatie die samenhangt met de kabels die een transformatorstation verlaten, vertegenwoordigd door KIK 5.

Daarnaast kunnen LV- en MV-kabels worden belast volgens het scenario met een volledige belastingsfactor of volgens het scenario zonder utiliteitsfactor (zie ook Paragrafen 2.2.2 en 2.3).

Tabel 8. WTM+ invoer: bodemtemperatuurverschillen ($\Delta T_{\text{boundary}}$) op 1 meter diepte op verschillende horizontale afstand van elektriciteitskabels.

Pipe-Cable Distance (m)	$\Delta T_{\text{boundary}}$				Substation regular
	LV and light MV regular	LV and light MV no utilization factor	Heavy MV regular	Heavy MV no utilization factor	
0	0.37	1.49	1.57	5.23	2.00
0.5	0.23	0.94	0.87	2.93	1.44
1	0.16	0.56	0.52	1.76	0.92
1.5	0.09	0.35	0.33	1.11	0.62
2	0.05	0.23	0.22	0.73	0.44
2.5	0.04	0.15	0.15	0.49	0.32
3	0.02	0.11	0.10	0.34	0.24

5.2.6 Modelconstanten

Daar waar de $\Delta T_{\text{boundary}}$ voor elke leiding in het WTM+ wordt toegekend op basis van het specifieke scenario, worden enkele andere parameters niet gevarieerd. Voor alle simulaties is hetzelfde EPANET-model van het van Almere gebruikt, waarbij voor elke leiding steeds dezelfde diameter en voor elk knooppunt steeds hetzelfde vraagpatroon werden aangehouden. De watertemperaturen in de reservoirs waren in alle scenario's respectievelijk 15 °C en 14 °C. PVC werd verondersteld het leidingmateriaal te zijn in het gehele netwerk, met een thermische

geleidbaarheid van $0,16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Deze aanname weerspiegelt het dominante leidingmateriaal in het drinkwaternet van Almere en PVC is het voorkeursmateriaal voor de toekomst. Daarnaast werd aan elke leiding in alle scenario's een *TSol* toegekend met een omvang van één leidingdiameter, in overeenstemming met eerdere bevindingen van Blokker et al. [2024].

5.2.7 Nabewerking van de WTM+ uitkomsten

Om de invloed van de afstand tussen kabel en leiding op de drinkwatertemperatuur te bepalen, zijn de resultaten van elke stadsbrede simulatie nader verwerkt door de temperatuurstijging (ΔT) te berekenen ten opzichte van een referentiesituatie zonder nabijgelegen elektrische infrastructuur. De procedure bestond uit de volgende stappen:

- 1 Voer de referentiesimulatie uit zonder nabijgelegen elektriciteitskabels om voor elke leiding de referentietijdreeks van de watertemperatuur te verkrijgen. Bepaal voor iedere leiding de gemiddelde temperatuur $T_{reference, average}$.
- 2 Voer de stadsbrede analyse uit voor de zeven mogelijke afstanden tussen kabels en leidingen (waarbij telkens de juiste temperatuur volgens Tabel 8 wordt toegekend). Bepaal voor iedere leiding de gemiddelde temperatuur $T_{scenario, average}$.
- 3 Bereken voor iedere leiding de gemiddelde temperatuurverandering (ΔT) als $\Delta T = T_{scenario, average} - T_{reference, average}$.
- 4 Vergelijk de ΔT van iedere leiding met een gekozen drempelwaarden van 0,25, 0,5, 1,0 en 2,0 °C. Bepaal voor elke drempel de totale lengte van de leidingen waarvoor deze wordt overschreden, uitgedrukt als percentage van de totale leidinglengte in het netwerk. Ook wordt het opgetelde verbruik op de leidingen boven de drempelwaarde uitgedrukt als een percentage van het totale verbruik in Almere. Deze percentages zijn gebruikt als belangrijkste prestatie-indicator om de thermische invloed van de verschillende scenario's voor benuttingsfactor, kabeldichtheid en afstand tussen kabel en leiding met elkaar te vergelijken.

5.3 Overwogen scenarios

Verschillende stadsbrede scenario's zijn geanalyseerd om de invloed van elektriciteitskabels op de drinkwatertemperatuur in uiteenlopende situaties te beoordelen.

5.3.1 Utiliteitsfactorscenarios

Er zijn drie scenario's voor de utiliteitsfactor van het elektriciteitsnetwerk beschouwd (Tabel 9, zie ook de toelichting in Paragraaf 2.3.2). Deze scenario's vertegenwoordigen verschillende belastingniveaus van de kabels en daarmee verschillende niveaus van warmteafgifte door de kabels. De scenario's zijn opgebouwd uit 'reguliere belasting' (met volledige belastingsfactor zoals beschreven in Paragraaf 3.3.2) en 'kabels zonder utiliteitsfactor' (waarin de utiliteitsfactor niet is meegenomen in de belastingsfactoren). De volgende scenario's zijn beschouwd:

- A. Strategische benuttingsfactor volledig toegepast: alle leidingen krijgen temperaturen toegewezen die overeenkomen met 'reguliere kabels'.
- B. Strategische utiliteitsfactor gerealiseerd, maar vervolgens overschreden: 90% van de leidingen krijgt temperaturen toegewezen die overeenkomen met 'reguliere kabels', terwijl 10% van de leidingen temperaturen toegewezen krijgt die overeenkomen met 'kabels zonder utiliteitsfactor'.
- C. Sterke overbelasting van kabels (om welke reden dan ook): alle leidingen krijgen temperaturen toegewezen die overeenkomen met 'kabels zonder utiliteitsfactor'.

Tabel 9. Verdeling van kabeldichtheidspercentages voor de drie utiliteitsfactorenscenario's.

Distribution % of different cable types across different diameter classes of pipe network under three different utilization factor scenarios						
Scenario	Pipe D (mm)	LV and light MV	LV and light MV no utilization factor	Heavy MV	Heavy MV no utilization factor	Substation
A utilization factor	All	91.95% (70% LV+ 21.95% light MV)	0	8.04%	0	0.01%
	<150	65.08	0	5.02	0	0
	150-250	15.72	0	1.04	0	0
	>250	11.15	0	1.98	0	0.01
B degraded utilization factor	All	82.75% (63% LV + 19.75% light MV)	9.2% (75 LV+ 2.2% light MV)	7.24%	0.80%	0.01%
	<150	58.57	6.51	4.52	0.5	0
	150-250	14.15	1.57	0.94	0.1	0
	>250	10.03	1.12	1.78	0.2	0.04
C no utilization factor	All	0	91.95% (70% LV+ 21.95% light MV)	0	8.04%	0.01%
	<150	0	65.08	0	5.02	0
	150-250	0	15.72	0	1.04	0
	>250	0	11.15	0	1.98	0.01

5.3.2 Kabeldichtheidsscenario's

De referentiepercentages voor kabeldichtheid die zijn vermeld in Tabel 7 en Tabel 9 zijn afgeleid van de kabeldichtheden volgden uit de GIS-analyse van de in Almere aanwezige infrastructuur. Daarnaast zijn aanvullende scenario's opgesteld waarin deze percentages zijn aangepast om alternatieve kabelverdelingen weer te geven die kunnen voorkomen in steden en dorpen met een hogere of lagere bebouwingsdichtheid. De bandbreedte van deze alternatieve kabeldichtheden is gebaseerd op een GIS-analyse van kabeldichtheden in alle buurten (CBS) binnen het voorzieningsgebied van Evides (Bijlage II). In de scenario's zijn de percentages van het totale aandeel middenspanningskabels (MV-kabels) verhoogd of verlaagd volgens de volgende opties:

	KIK1	KIK1	KIK4	
• 90% LV	6,16% lichte MV	3,83% zware MV		
• 80% LV	14,63% lichte MV	5,36% zware MV		
• 70% LV	21,95% lichte MV	8,04% zware MV		(baseline uit Tabel 7)
• 60% LV	29,27% lichte MV	10,72% zware MV		
• 50% LV	36,59% lichte MV	13,4% zware MV		
• 30% LV	51,23% lichte MV	18,76% zware MV		
• 10% LV	65,86% lichte MV	24,13% zware MV		

5.4 Uitkomsten

5.4.1 Referentiescenario

Het referentiescenario vertegenwoordigt de situatie zonder invloed van nabijgelegen elektriciteitskabels. Deze situatie dient als basis voor vergelijking met alle scenario's waarin kabels aanwezig zijn. Op die manier wordt inzicht verkregen in de specifieke bijdrage van de kabels aan de drinkwatertemperatuur. Figuur 29 toont de gemiddelde watertemperatuur die voor elke leiding in het netwerk van Almere gedurende de simulatieperiode is berekend. De resultaten laten duidelijke ruimtelijke variaties in de watertemperatuur binnen het netwerk zien, met temperaturen die variëren van 14 °C tot 23,5 °C. Deze laatste temperatuur komt overeen met de aan elke leiding toegewezen $T_{boundary}$ en is in deze studie de hoogst bereikbare temperatuur in afwezigheid van aanvullende warmtebronnen. De lagere temperaturen worden over het algemeen aangetroffen in de transportleidingen die de bronnen verbinden met de verschillende gebieden van de stad. Dit is te verwachten, aangezien deze leidingen grote hoeveelheden water transporteren met relatief hoge stroomsnelheden, waardoor het water onvoldoende tijd heeft om op te warmen. Verder stroomafwaarts takken kleinere leidingen af om afzonderlijke delen van de stad van water te voorzien. In deze leidingen, die een kleiner volume hebben, beweegt het water langzamer. Juist in deze leidingen kan het water de temperatuur van de omringende bodem aannemen.



Figuur 29. Gemiddelde watertemperatuur per leiding in het referentiescenario.

5.4.2 Invloed van kabels op de drinkwatertemperatuur

De percentages van de totale leidinglengte en verbruik waarvoor verschillende ΔT -drempelwaarden worden overschreden in het scenario met een volledige belastingsfactor (Scenario A) zijn samengevat in het bovenste deel van Tabel 10. Hieruit blijkt dat de afstand tussen kabel en leiding een beperkte invloed heeft op de temperaturen binnen het drinkwaternetwerk. Op de kortste afstand, 0 m, wordt de temperatuur in 65% van de leidinglengte (73% van het verbruik) met meer dan 0,25 °C verhoogd, maar slechts 5% van de leidinglengte (7% van het verbruik) ondervindt daarbij een verhoging van meer dan 0,5 °C. Vanaf een halve meter worden nog maar enkele procenten van het leidingnet merkbaar beïnvloed.

Tabel 10 geeft ook de invloed in de andere utiliteitsfactorenscenario's. De invloed van de utiliteitsfactor is duidelijk zichtbaar:

- In scenario B (grootschalige maar geloofwaardige congestie) is de invloed van kabels op de drinkwatertemperatuur wat hoger dan in scenario A, maar nog steeds relatief beperkt. Enkele procenten van het verbruik ervaren op 0 meter afstand een verhoging van meer dan 1 °C. De verhoging is verwaarloosbaar op afstanden van 1 m of verder.
- In scenario C (ongeloofwaardig hoge overbelasting van alle kabels) wordt meer dan enkele procenten van het leidingnet met meer dan 1 °C beïnvloed op korte afstand, en is enige beïnvloeding merkbaar op afstanden voorbij de halve meter

Tabel 10. Invloed van kabels op de gemiddelde drinkwatertemperatuur voor verschillende afstanden tussen kabels en leidingen onder invloed van verschillende utiliteitsscenario's. Boven: uitgedrukt in het percentage van het leidingnet dat wordt beïnvloed. Onder: uitgedrukt in het percentage verbruik in Almere dat wordt beïnvloed.

Lengte (op basis van gemiddelde temperaturen)

Scenarios	pipe-cable distances (m)	% Pipe Length $\Delta T > 0.25^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 0.5^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 1.0^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 2.0^\circ\text{C}$
Utilization Factor	0	65	5	1	0
	0.5	11	2	0	0
	1	2	0	0	0
	1.5	1	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2.5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
Degraded Utilization Factor	0	76	18	3	0
	0.5	32	4	0	0
	1	7	1	0	0
	1.5	2	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2.5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
No Utilization Factor	0	95	89	65	5
	0.5	91	76	10	1
	1	82	39	2	0
	1.5	60	3	0	0
	2	9	1	0	0
	2.5	2	0	0	0
	3	0	0	0	0

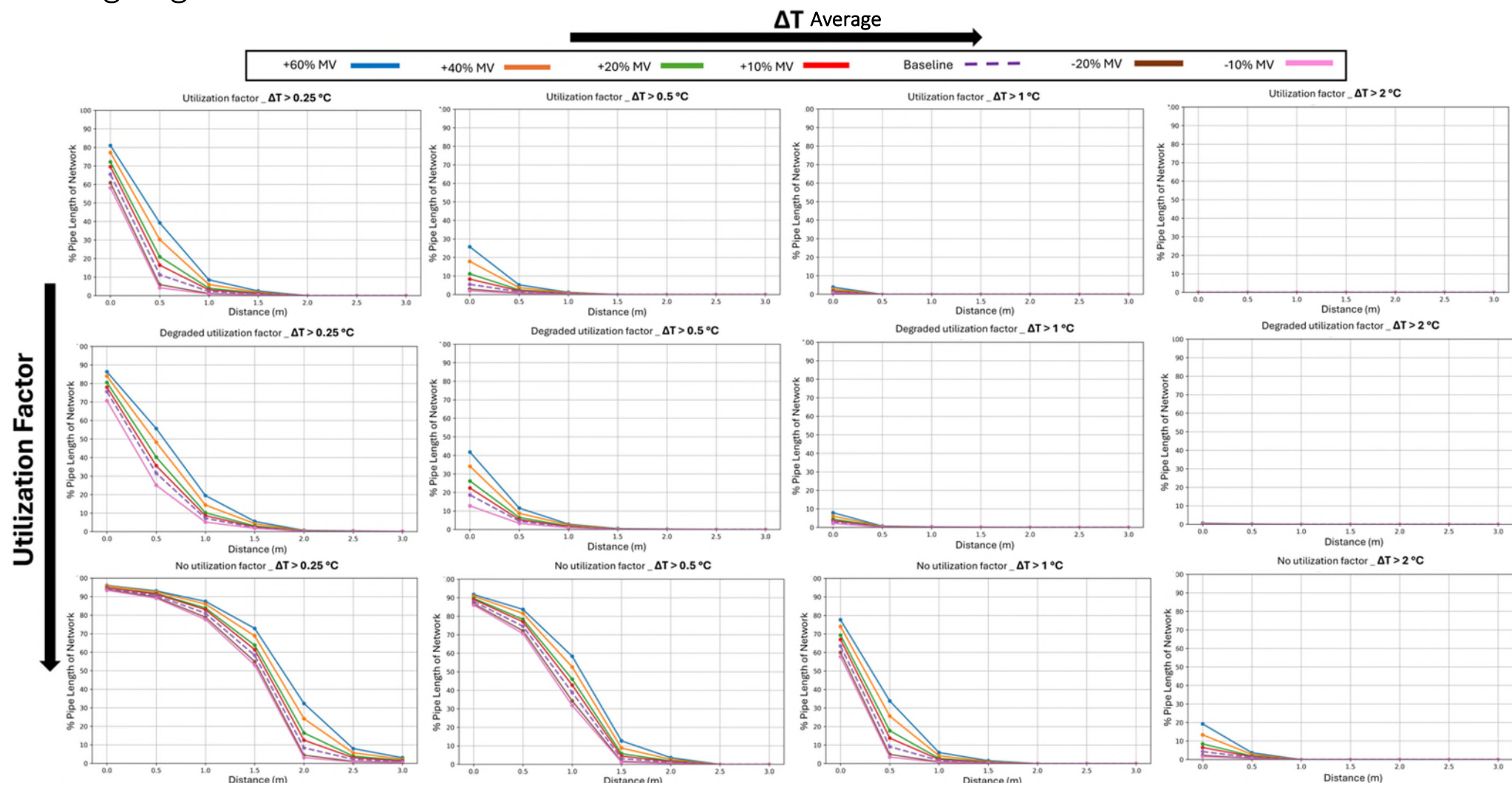
Verbruik (op basis van gemiddelde temperaturen)

Scenarios	pipe-cable distances (m)	% Demand $\Delta T > 0.25^\circ\text{C}$	% Demand $\Delta T > 0.5^\circ\text{C}$	% Demand $\Delta T > 1.0^\circ\text{C}$	% Demand $\Delta T > 2.0^\circ\text{C}$
Utilization Factor	0	73	7	1	0
	0.5	13	1	0	0
	1	2	0	0	0
	1.5	1	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2.5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
Degraded Utilization Factor	0	84	22	3	0
	0.5	38	5	0	0
	1	8	1	0	0
	1.5	2	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2.5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
No Utilization Factor	0	99	97	73	5
	0.5	99	85	13	1
	1	91	39	1	0
	1.5	63	3	0	0
	2	12	1	0	0
	2.5	2	0	0	0
	3	1	0	0	0

5.4.3 De invloed van kabeldichtheid

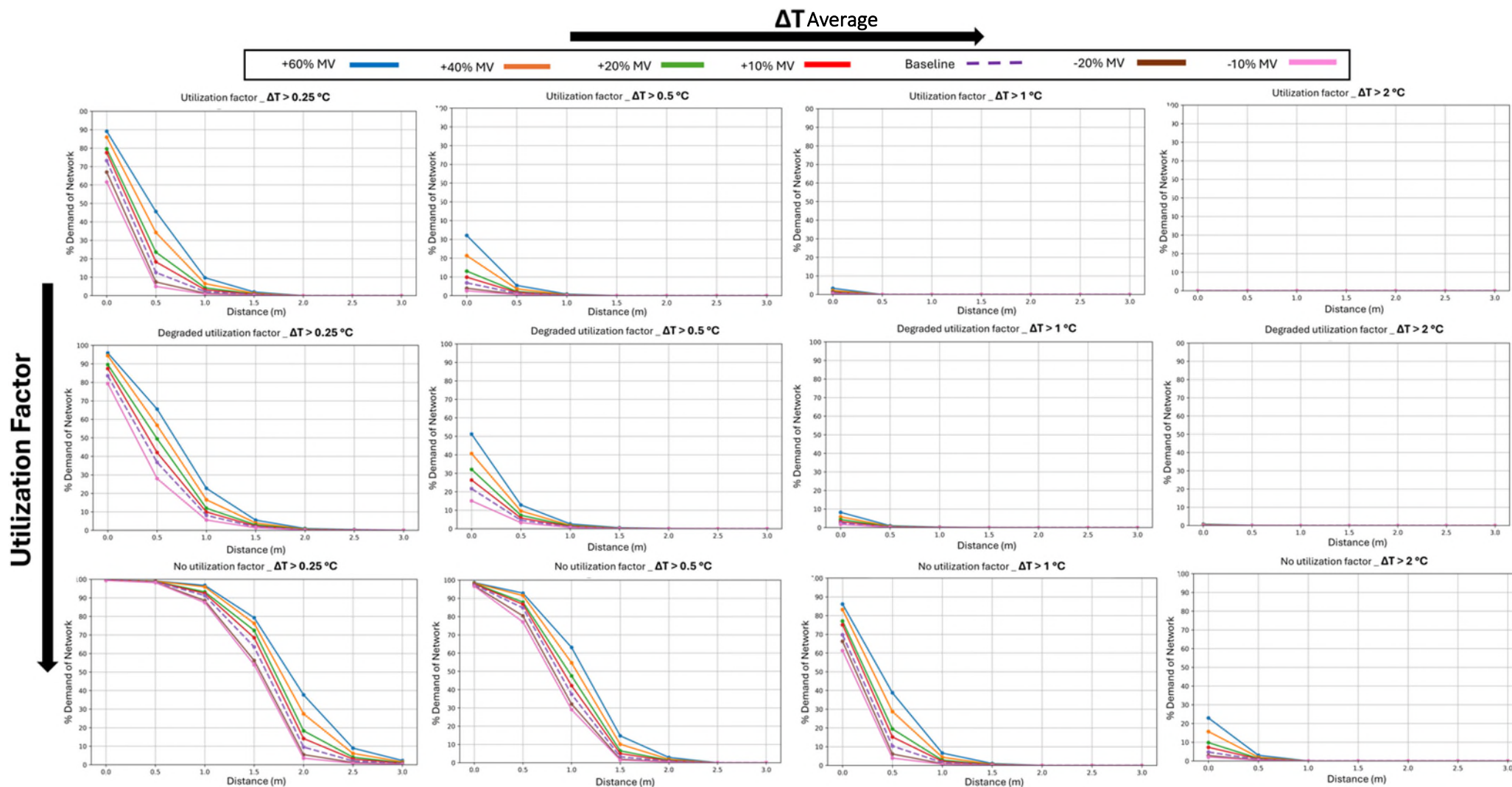
Figuur 30 en Figuur 31 tonen de invloed van variërende kabeldichtheid. Voor ieder van de kabeldichtheidsscenario's is met een curve het percentage van ofwel de leidinglengte (Figuur 30) ofwel het verbruik (Figuur 31) in de stad dat de gekozen ΔT -drempelwaarde overschrijdt, als functie van de afstand tussen kabel en leiding. De resultaten laten zien dat steden met een hoger aandeel middenspanningskabels grotere temperatuurstijgingen in het gehele netwerk ervaren en andersom. Ten opzichte van de reguliere dichtheid in Almere (Tabel 10) is één belangrijke observatie dat vanaf 20% (realistisch in stedelijk gebied, afgaande op de data in Bijlage II) extra middenspanning in scenario B meer dan 5% van het verbruik met meer dan 1 °C opwarmt op 0 m afstand, maar op afstanden van 0.5 m en groter blijft deze mate van verhoging uit. (De verhoging met 0.25 °C en 0.5 °C nemen wel met tientallen procenten toe bij deze hogere kabeldichtheden).

Leidinglengte



Figuur 30. $\Delta T_{\text{gemiddeld}}$ -curves (% beïnvloede leidinglengte als functie van afstand tussen kabel en leiding) voor varianten van Almere met verschillende kabeldichtheden qua MV-kabels.

Verbruik



Figuur 31. $\Delta T_{\text{gemiddeld}}$ -curves (% invloed verbruik als functie van afstand tussen kabel en leiding) voor varianten van Almere met verschillende kabeldichtheden qua MV-kabels.

5.4.4 Analyse van lokale temperatuurverhogingen in Almere

Achter de stedelijke gemiddelden en percentages in Tabel 10, Figuur 30 en Figuur 31 gaan verzamelingen van lokale situaties schuil. Het is zinnig om binnen de stadsbrede analyse in te zoomen op deze situaties om te zien waar de risico's op structurele temperatuurverhogingen zich typisch voordoen. Immers: ook wanneer de globale percentages van temperatuurverhogingen acceptabel zijn wat de nutsbedrijven betreft is het belangrijk om aandacht te blijven hebben voor de groep huishoudens of straten die wel structureel een te hoge drinkwatertemperatuur hebben.

Figuur 32 zoomt in op de temperaturen onder utilisatiescenario A in twee gebieden in Almere, een typische "bloemkoolwijk" volgens oude aanlegprincipes (boven) en een "zelfreinigende wijk" volgens moderne principes. Rechts in de figuur is weergegeven wat de bodemtemperatuurverhogingen door kabels rond de leidingen zijn (opgelegde randvoorwaarden op basis van Hoofdstuk 3). Links is voor de twee kortste afstanden, 0 m en 0,5 m, aangegeven wat de daadwerkelijke, gemiddelde drinkwatertemperatuurverhogingen zijn. Daarbij is aan de hand van de lijndikten zichtbaar gemaakt wanneer de drinkwatertemperatuurverhoging de grens van 1 °C of 2 °C over gaat. De volgende zaken vallen op:

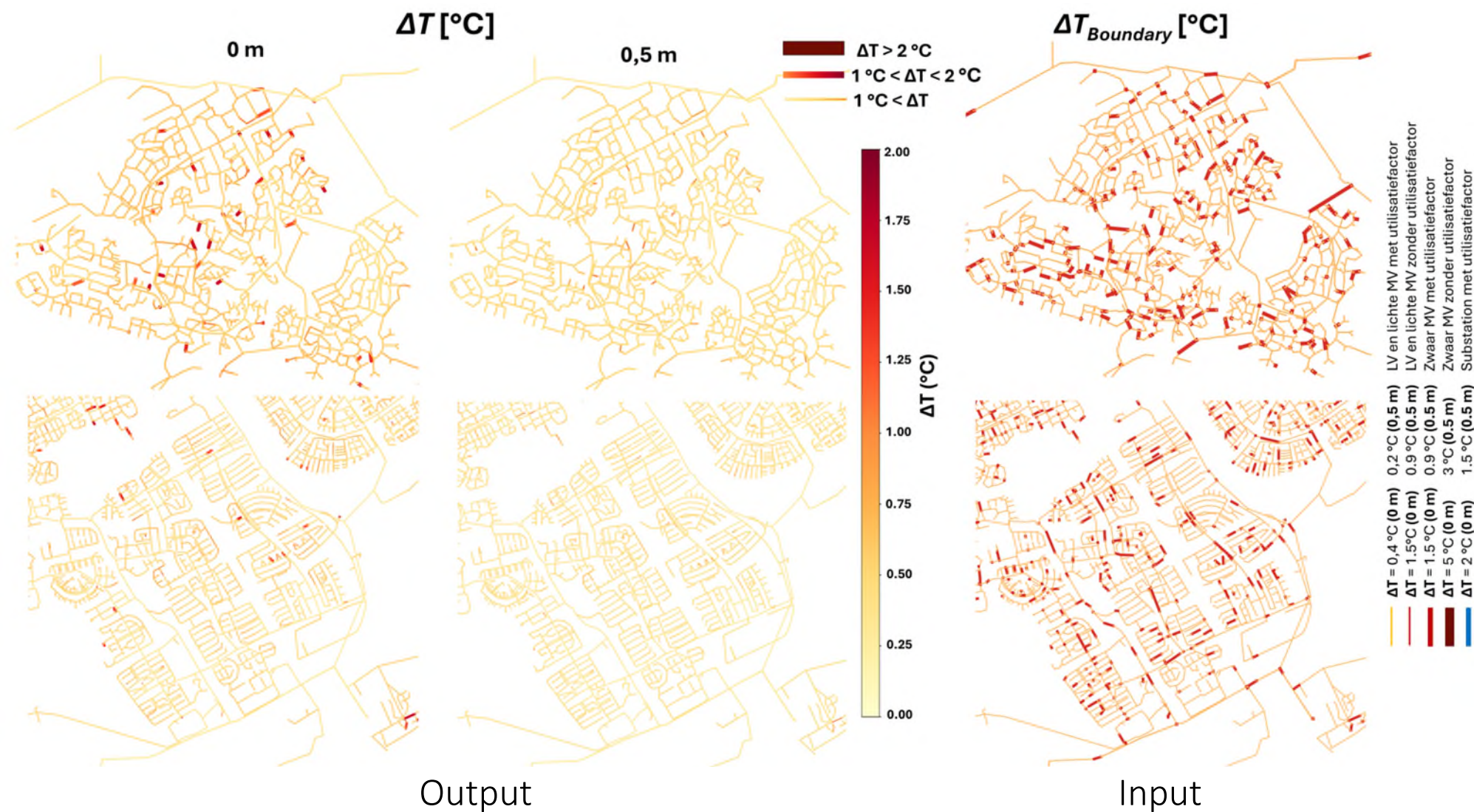
- lokale temperatuurverhogingen dempen uit: in veel van de segmenten met een opgelegde bodemtemperatuurverhoging van >1 °C (namelijk: 1,5 °C) komt de daadwerkelijke, gemiddelde watertemperatuurverhoging vervolgens niet uit boven de 1 °C;
- de hoogste verhogingen treden – volgens verwachting – op in de uiteinden van het leidingnet;
- er treedt – volgens verwachting – meer verhoging op op 0 m afstand dan op 0,5 m afstand, waarbij overschrijdingen die op 0 meter boven de 1 °C vallen teruggaan naar onder de 1 °C voor 0,5 m.
- er treedt meer verhoging op in de bloemkoolwijk dan in de zelfreinigende wijk. De verklaring ligt in een subtiel samenspel van effecten van het verschil in topologie:
 - a in de zelfreinigende wijk zijn de leidingdiameters structureel kleiner;
 - b daardoor stroomt water sneller door de leidingen en is de verblijftijd per leiding korter, dus is er minder tijd voor opwarming;
 - c ook is het volume per leiding kleiner, dus gaat opwarming sneller;
 - d effect (b) en effect (c) heffen elkaar op, blijkt uit eerdere berekeningen door Blokker en Pan [2022];
 - e het andere verschil met de bloemkoolwijk is dat het water in de zelfreinigende wijk eerst via de secundaire structuur grof over de wijk verdeeld wordt en dan via de tertiaire netten tegelijk naar alle straten wordt gebracht (in de bloemkoolwijk zijn straten meer serieel aan elkaar geregen);
 - f water stroomt wordt daardoor blootgesteld aan minder lengte aan leidingnet voordat het door een huis opgenomen wordt, waardoor er minder warmte door het water wordt opgenomen.

Figuur 33 en Figuur 34 geven dezelfde analyse voor respectievelijk utiliteitsscenario's B en C. In aanvulling op de bovengenoemde, terugkerende observaties vallen de volgende zaken op voor scenario B:

- zoals verwacht treedt er ten opzichte van scenario A meer temperatuurverhoging op in scenario B (inclusief enkele temperatuurverhogingen van 2 °C of meer), en nog weer meer verhoging in scenario C;
- de locaties van de extremere temperatuurverhogingen in scenario B vallen samen met de locaties waar de kabels een verhoogde belasting hebben ("zonder utilisatiefactor" op het kaartje rechts), maar de extremere temperatuurverhogingen manifesteren zich alleen wanneer die verhoogde belasting samenvalt met een locatie aan het uiteinde van het leidingnet;
- ten opzichte van het vorige punt is voor scenario B één uitzondering zichtbaar waar een hot spot op een doorlopende leiding pas benedenstrooms tot temperatuurverhoging leidt. Deze locatie is aangegeven met het gestippelde vierkant in Figuur 33;
- hot spots in de ene wijk beïnvloeden de andere wijk niet.

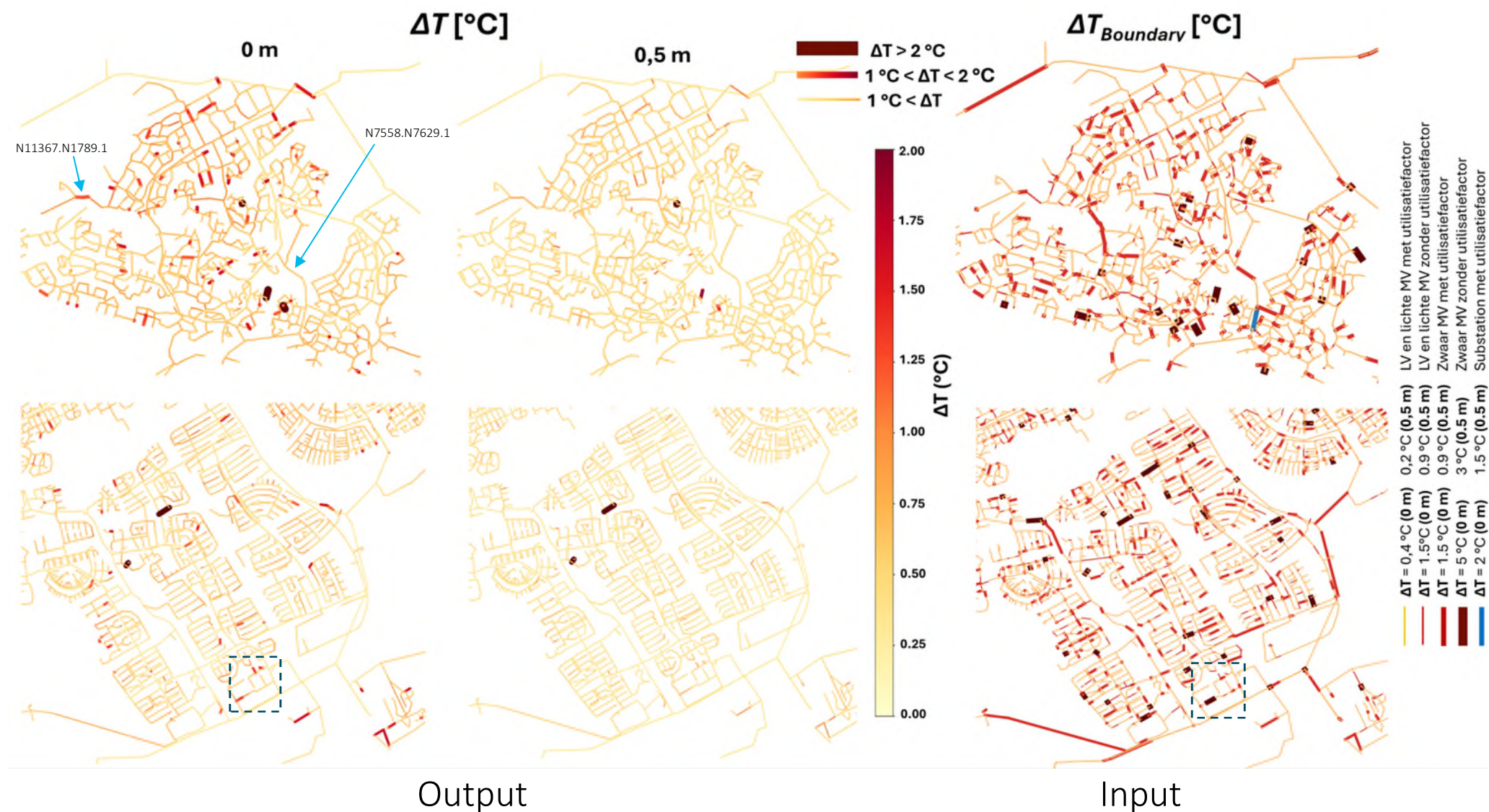
Scenario C is niet realistisch binnen de huidige kaders van kabelbeheer, maar wel informatief. Leidingen ervaren hier structureel een bodemtemperatuurverhoging van minstens 1,5 °C, met hot spots van 5 °C. We zien dat de structurele bodemtemperatuurverhoging van 1,5 °C in grote delen van het leidingnet nog steeds worden uitgedempt tot watertemperatuurverhogingen onder de 1,5 °C. We zien echter ook dat de structurele bodemtemperatuurverhoging de watertemperatuurverhoging wel “op scherp zet”, zodat er veel grotere – ook benedenstroomse – effecten zijn van de hot spots van 5 °C. enkele voorbeelden zijn gemarkeerd met de gestippelde vierkanten in Figuur 34. De les die hieruit te leren is, is dat de overkoepelende, bovenstroomse situatie in de stad een bijdrage levert aan de lokale temperatuuroverschrijdingen.

Utilisatiescenario A (volledig toegepaste factor)



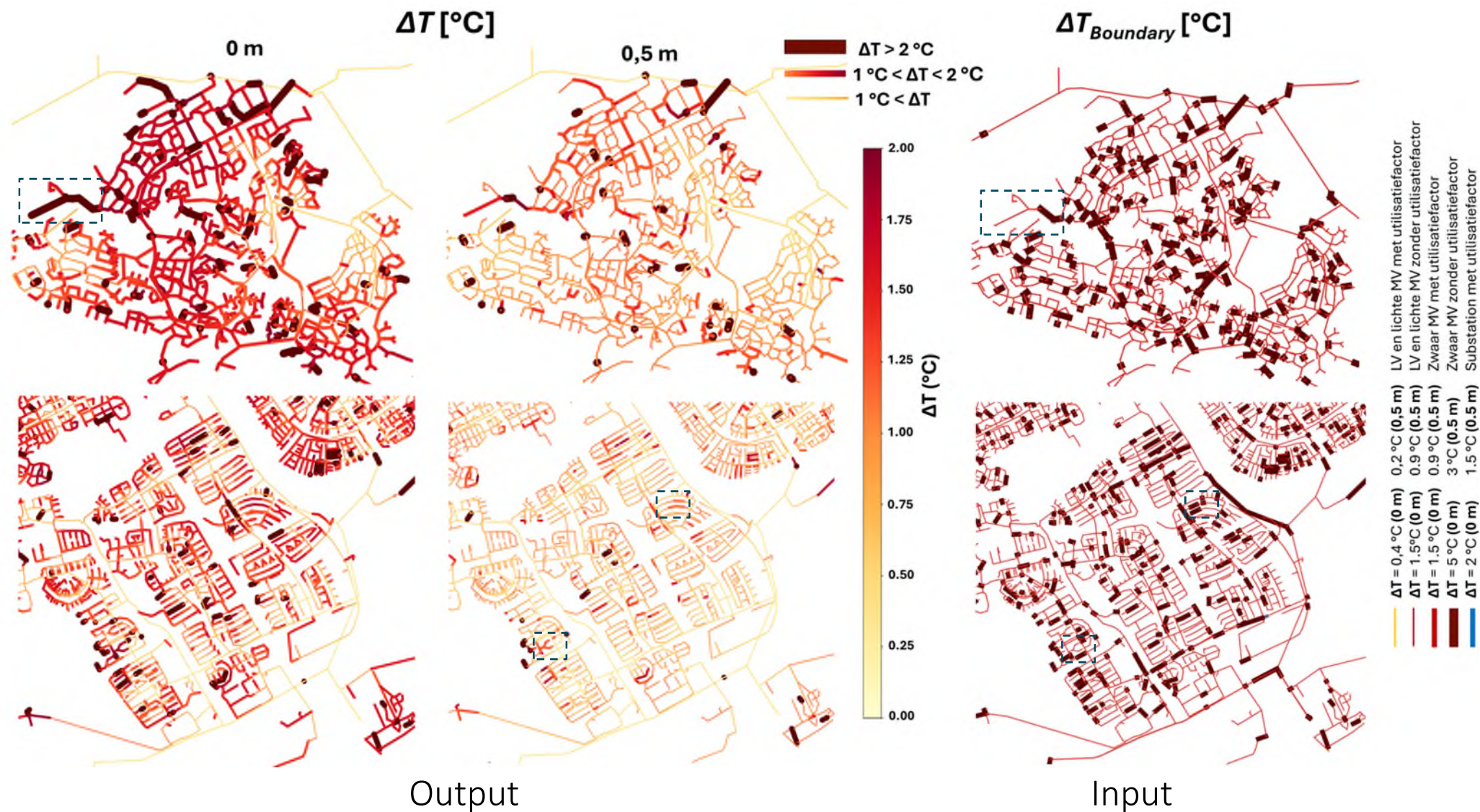
Figuur 32. Vergelijking van opgelegde bodemtemperatuurverhogingen en daadwerkelijke gemiddelde watertemperatuurverhogingen voor twee wijken in Almere in utilisatiescenario A. Zie de tekst voor toelichting.

Utilisatiescenario B (gedeeltelijk toegepaste factor)



Figuur 33. Vergelijking van opgelegde bodemtemperatuurverhogingen en daadwerkelijke gemiddelde watertemperatuurverhogingen voor twee wijken in Almere in utilisatiescenario B. Zie de tekst voor toelichting.

Utilisatiescenario C (geen factor)



Figuur 34. Vergelijking van opgelegde bodemtemperatuurverhogingen en daadwerkelijke gemiddelde watertemperatuurverhogingen voor twee wijken in Almere in utilisatiescenario C. Zie de tekst voor toelichting.

5.5 Discussie

De analyses in dit hoofdstuk tonen de potentiële invloed van elektriciteitskabels op de drinkwatertemperatuur. De resultaten laten zien hoe de afstand tussen kabel en leiding, kabelbelasting en kabeldichtheid elk van invloed zijn op de drinkwatertemperatuurverhoging. De belangrijkste overkoepelende bevindingen zijn:

- In het scenario met lage belasting (volledige utilisatiefactor) en in het scenario met geloofwaardig hoge belasting (gedeeltelijke utilisatiefactor) worden slechts enkele procenten van het netwerk (leidinglengte of vraag) beïnvloed met een ΔT van meer dan 1 °C, ongeacht de dichtheid van middenspanningskabels, en wel alleen bij de kortste afstand (leiding recht onder de kabel).
- Wel kunnen - bij afstanden tussen kabel en leiding van 0,5 m of minder en afhankelijk van de precieze kabeldichtheid – enkele tientallen procenten van het leidingnet een ΔT tussen 0,25 °C en 0,5 °C ondervinden.
- De grootste drinkwatertemperatuurverhogingen treden op rond lokale combinaties van verhoogde kabelbelasting en leidingnetuiteinden, maar bovenstroomse omstandigheden hebben wel invloed op de kwetsbaarheid voor dergelijke combinaties.

Een tekortkoming van de huidige aanpak is dat deze volledig berust op een probabilistische toewijzing van leiding-kabelcombinaties. Dit betekent dat de algemene structuur van een scenario resulteert in een mozaïek van afwisselende leiding-kabelcombinaties. In werkelijke situaties zal er meer samenhang bestaan tussen lokale leiding-kabelcombinaties, en het is mogelijk dat opeenvolgende secties met dezelfde leiding-kabelcombinaties langs een tracé elkaars thermische invloed versterken. Het opzetten van een stadsbreed scenario met doelbewust toegewezen leiding-kabelcombinaties zou in de toekomst moeten worden gebruikt om te onderzoeken in hoeverre de momenteel geschatte thermische invloed dit effect onderschat of overschat.

Een tweede punt van aandacht is de selectie van maatgevende scenario's (2.3) en in het bijzonder de keuze om zowel de lichte middenspanningskabels als het laagspanningsnet in de stadsbrede analyse te beschrijven aan de hand van KIK 1 gebaseerd op casus 1b met enkel laagspanningskabels (Bijlage I). Gedurende het onderzoek werd duidelijk dat casus 1a toch een wat hogere thermische uitstraling heeft dan origineel gedacht. De uitstraling door de ~22% lichte middenspanningskabels (Tabel 7) wordt dus onderschat. Om na te gaan wat het effect is van deze vereenvoudiging, is ook een stadsbrede analyse voor de reguliere kabeldichtheid van Almere en utilisatiescenario A uitgevoerd op basis van verdere opsplitsing van kabelinfrastructuurklassen:

- 70% Laagspanning beschreven met KIK 1a;
- 22% Lichte middenspanning beschreven met KIK 1b;
- 8% zware middenspanning beschreven met KIK 4.

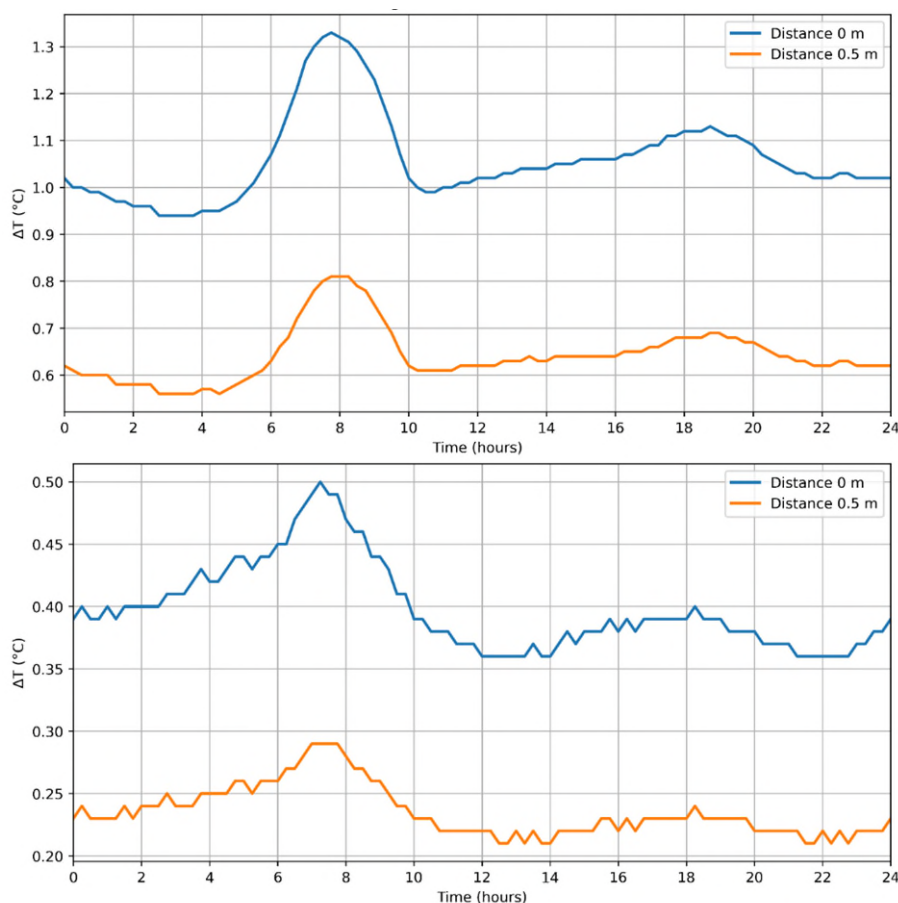
Het resultaat is weergegeven in Tabel 11. Vergelijking met Tabel 10 (boven) laat zien dat de verhoogde belasting van de 22% lichte middenspanningskabels een beperkt effect heeft. Op 0 m afstand neemt het percentage leidingen dat met 0,25 °C of 0,5 °C beïnvloed wordt met ongeveer 10 procentpunt toe. Op 0.5 m afstand neemt het percentage leidingen dat met 0,25 °C beïnvloed wordt met ongeveer 20 procentpunt toe. Op 1 m afstand neemt het percentage leidingen dat met 0,25 °C beïnvloed wordt met ongeveer 3 procentpunt toe.

Tabel 11. Invloed van kabels op de gemiddelde drinkwatertemperatuur voor verschillende afstanden tussen kabels en leidingen onder invloed van utiliteitsscenario A op basis van een aangescherpte verdeling van kabelinfrastructuurklassen over het netwerk.

Scenarios	pipe-cable distances (m)	% Pipe Length $\Delta T > 0.25^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 0.5^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 1.0^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 2.0^\circ\text{C}$
Utilization Factor	0	74	16	1	0
	0,5	31	1	0	0
	1	5	0	0	0
	1,5	1	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2,5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0

Een derde tekortkoming van de huidige aanpak is dat er wordt gewerkt met de gemiddelde ΔT en dat er geen inzicht is ontwikkeld of die ΔT voor een bepaalde duur hoger of lager zou kunnen zijn. Een aanvullende beperking is dan wel dat er in deze studie is gewerkt met uitgemiddelde drinkwatervraagpatronen. Daardoor zal een knoop op ieder moment enig verbruik hebben en zal water veel minder vaak lokaal stil komen te staan in het model dan in de praktijk het geval is. Dat is relevant aangezien juist de netuiteinden gevoelig blijken. Voor de gemiddelde ΔT zal dit weinig consequenties hebben, maar wanneer wordt onderzocht hoe de ΔT over de dag verloopt, zal het waardevol zijn om aanvullende modelering met lokale watervraagpatronen op te zetten.

De temperatuurschommelingen op twee leidingsegmenten (de segmenten gemarkeerd met pijlen in Figuur 32) voor het huidige model met het huidige vraagpatroon zijn weergegeven in Figuur 35. De curves laten zien dat er inderdaad een schommeling optreedt. En dat het temperatuurverschil op bepaalde momenten enkele tienden van graden hoger kan zijn dan het gemiddelde. Om de stadsbrede invloed van dit aspect te onderzoeken is een aanvullende stadsbrede analyse uitgevoerd op basis van maximum temperatuurverhogingen voor utilitesscenario's A en B voor de reguliere kabeldichtheid van Almere. De uitkomsten zijn opgenomen in Tabel 12. Ook deze aanscherping leidt tot een beperkt effect. De percentages leidinglente die op 0 tot 1 m met 0,25 °C of 0,5 °C beïnvloed worden nemen 2 tot 20 procentpunt toe. De belangrijkste verandering is dan in utiliteitsscenario B het percentage leidingen dat op 0 m afstand met meer dan 1 °C beïnvloed wordt, toeneemt met 4 procentpunt naar een totaal van 7%. Op grotere afstanden blijft dat percentage 1% of lager. Herhalen van de volledige gevoeligheidsstudie achter Figuur 30 zou kunnen uitwijzen hoeveel hoger dit nog wordt bij hogere kabeldichtheden; op basis van de trends in die figuur loopt de beïnvloeding dan potentieel op tot 13% beïnvloeding van meer dan 1 °C op 0 m afstand, maar nog steeds minimale beïnvloeding op grotere afstanden.



Figuur 35. Tijdsreeks van ΔT op leidingsegmenten N11367.N1789.1 (boven) en N7558.N7629.1 (onder) voor de laatste 72 van de stadswijde analyses van utiliteitsscenario's A en B.

Tabel 12. Invloed van kabels op de maximale drinkwatertemperatuur voor verschillende afstanden tussen kabels en leidingen onder invloed van verschillende utiliteitsscenario's, uitgedrukt in het percentage van het leidingnet dat wordt beïnvloed. In deze resultaten is niet gewerkt met de splitsing van KIK 1a en KIK 1b zoals in Tabel 11.

Scenario	pipe-cable distances (m)	% Pipe Length $\Delta T > 0.25^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 0.5^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 1.0^\circ\text{C}$	% Pipe Length $\Delta T > 2.0^\circ\text{C}$
Utilization Factor	0	85	11	3	0
	0,5	17	3	0	0
	1	5	1	0	0
	1,5	2	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2,5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
Degraded Utilization Factor	0	89	28	7	0
	0,5	42	10	1	0
	1	14	2	0	0
	1,5	5	0	0	0
	2	0	0	0	0
	2,5	0	0	0	0
	3	0	0	0	0

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De centrale vraag achter dit onderzoek is: *hoe wordt de drinkwatertemperatuur beïnvloed door ontwerpkeuzen met betrekking tot de gezamenlijke inpassing van elektriciteitskabels en drinkwaterleidingen in de ondergrond?* De gepresenteerde analyses wijzen uit dat met name de gemiddelde belasting van de kabels (o.a. bepaald door de redundantie en utilisatiefactor in het ontwerp) en de stedelijke dichtheid van de zwaardere bundels van middenspanningskabels bepalen wat de bijdragen van de kabels is aan de drinkwatertemperatuur door de stad heen. Tabel 10 en Figuur 30 bieden een overzicht van de gevoeligheid voor deze factoren op stedelijke schaal. De percentages van het leidingnet met de hoogste watertemperatuurverhogingen bevinden zich meestal op de locaties waar hoger belaste kabels samenvallen met de uiteinden van het leidingnet en slechts sporadisch op doorgaande leidingen.

Bovengrondse factoren zoals maaiveldbedekking, schaduw en seizoen hebben weliswaar een duidelijke invloed op de absolute temperaturen in de bodem, maar hebben geen of minimaal effect op de beïnvloeding van de drinkwatertemperatuur door kabels: bij hoge of bij lage achtergrondtemperatuur blijft de bijdrage van de kabels vergelijkbaar. Deze studie gaat uit van een redelijk droge bodem met matige thermische geleiding; bij hogere thermische geleiding en/of convectie in een vochtige bodem (bijvoorbeeld vanwege de aanwezigheid van grondwater) wordt de bijdrage van de elektriciteitskabels aan het totaal naar verwachting kleiner, maar dat is niet expliciet gemodelleerd.

De bodemtemperatuur rond leidingen en de resulterende drinkwatertemperatuur zijn een gevolg van veel verschillende factoren. Ten opzichte van overige factoren in de omgeving van de leiding en de voorheen onderzochte invloed van warmtenetten blijkt de bijdrage van elektriciteitskabels minder krachtig (mits de huidige werkwijzen en uitgangspunten qua kabeldichtheid, redundantie en utilisatie worden gehandhaafd). Ter illustratie:

- omzetten van de maaiveldbedekking van tegels naar gras reduceert de bodemtemperatuur rond de leidingen met ongeveer 3 °C, zie Tabel 3 in Hoofdstuk 3;
- leidingen 0,25 m dieper aanleggen reduceert de bodemtemperatuur rond de leidingen met maximaal 1,5 °C, zie Figuur 12 in Hoofdstuk 3;
- ~5% van de vraag ondervindt een watertemperatuurverhoging van > 1 °C wanneer er een warmtenet structureel op 1,5 m afstand van leidingen gelegd wordt (hier niet onderzocht, maar terug te lezen in Blokker en Pan [2022]);
- ~7% - 13% van de vraag ondervindt een watertemperatuurverhoging van > 1 °C wanneer het elektriciteitsnet structureel op 0 m afstand van leidingen gelegd wordt zie Figuur 31 en de kanttekening rond Tabel 12. Op 0,5 m afstand ondervindt 0% tot 1% van de vraag deze verhoging, zelfs in tijden van congestie.
(Merk op dat een afstand van 0 meter in de regel niet wordt aangelegd en dat een dergelijke situatie om meerdere redenen als onwenselijk wordt gezien door beide sectoren. Bovenstaande vergelijking van de thermische beïnvloeding op 0 m en 0,5 m geeft echter wel aan dat als er aangelegd zou worden op afstanden onder de 0,5 m, men daarmee in de richting van merkbare thermische beïnvloeding beweegt).

Wat dat betreft is op basis van het onderzoek te verwachten dat het mogelijk moet zijn voor netbeheerders en drinkwaterbedrijven om te komen tot overeenstemming over een gewenste minimale afstand tussen kabels en leidingen.

6.2 Aanbevelingen

6.2.1 Aanbevelingen voor toepassing

Het onmiddellijk beoogde doel voor de resultaten van dit onderzoek is om inhoudelijk houvast te bieden tijdens het uitwerken van sectorafspraken tussen drinkwatersector en netbeheerders over afstanden tussen kabels en leidingen, waarbij onder andere de thermische beïnvloeding een punt van aandacht is. Het volgende wordt aanbevolen met betrekking tot die afspraken:

- Omdat de relatie tussen afstand en thermische beïnvloeding zo sterk afhankelijk is van de kabeldichtheid en de gemiddelde kabelbelasting (o.a. bepaald door redundantie en utilisatie), wordt aanbevolen om afspraken over afstanden te verbinden aan de huidige verwachtingen over de toekomstige kabeldichtheid en kabelbelasting. (Bijvoorbeeld: *we verwachten voor de toekomst dichtheid α en utilisatie β en daarom zeggen we dat afstand γ voldoende is om te zorgen dat in hooguit $\delta\%$ van het leidingnet de drinkwatertemperatuur met meer dan ϵ °C wordt beïnvloed*).
- Daarbij is het belangrijk om in het achterhoofd te houden dat kabeldichtheid en kabelbelasting kunnen veranderen gedurende de levensduur van de infrastructuur vanwege stedelijke en maatschappelijke ontwikkeling. Aangezien de drinkwatertemperatuur ook voor de langere termijn geborgd moet blijven, wordt aanbevolen om in de afspraken uit te gaan van de hoogste structurele belasting die tijdens de levensduur van de infrastructuur wordt verwacht. (Dus: als het geloofwaardig is dat de utilisatiefactor uiteindelijk gedeeltelijk of geheel benut kan worden door (on)verwachte vraagontwikkeling, baseer de afspraken dan op dat scenario).
- De kabelinfrastructuurklassen die in deze studie zijn geanalyseerd, betreffen de voorkeursontwerpen voor toekomstige, nieuw aan te leggen infrastructuur. De stadsbrede scenario's beschrijven theoretische situaties waarbij die voorkeursontwerpen zijn doorgevoerd in de gehele stad. In werkelijkheid zal het decennia duren om naar die situaties toe te groeien. Ten opzichte van nieuwbouwwijken zal het daarbij moeilijk zijn om deze voorkeursontwerpen te handhaven bij iedere reconstructie of renovatie van de complexere bestaande situaties. Het zal verleidelijk zijn om reconstructies in de binnensteden buiten beschouwing te laten bij het maken van afspraken. Juist in die dichtbevolkte gebieden zal het echter van belang zijn om de drinkwatertemperatuur onder controle te houden. Het wordt aanbevolen om expliciete aandacht te hebben voor het verschil tussen reconstructies en nieuwbouwwijken en om afspraken te maken voor beide.
- Het belangrijk om in het achterhoofd te houden dat huidige verwachtingen en beste werkwijzen geen garanties zijn voor toekomstig beleid en maatschappelijke ontwikkelingen. Het wordt aanbevolen om de afspraken na enige tijd te evalueren en daarbij ook de eventuele veranderingen in de verwachtingen rond kabeldichtheid, redundantie en utilisatie in ogenschouw te nemen.
- Tenslotte wordt aanbevolen om de situaties die in de uiteindelijke afspraken worden overwogen nog eens gedetailleerd door te rekenen met de methodieken en inzichten uit dit onderzoek, met aandacht voor de aanbevelingen in Paragraaf 6.2.2.

6.2.2 Ruimte voor aanscherping

Tijdens de opbouw van deze studie zijn mogelijkheden tot aanscherping geïdentificeerd die niet meer binnen het project pasten. De volgende aanvullende analyses zouden kunnen leiden tot relevante inzichten:

- Analyse van een stadsbreed scenario met doelbewust toegewezen leiding-kabelcombinaties op basis van realistische kabelnetstructuren zou kunnen uitwijzen in hoeverre de thermische invloed in deze studie wordt onderschat vanwege de probabilistische opbouw van de stadsbrede scenario's (zie Paragraaf 5.5).
- Uitsplitsen van laagspanning en lichte middenspanning in aparte KIK zou beter recht doen aan de invloed van het middenspanningsnet (zie Paragraaf 5.5).
- Analyse van de bodemtemperatuur op extra afstanden tussen de 0 en de 0,5 m met behulp van BTM+ en opvolgend WTM+ kan van dienst zijn wanneer er nagedacht wordt over fijnmazigere afstanden tussen kabels en leidingen.
- Reken in alle volgende analyses met de maximale temperatuurverhoging per leiding in plaats van de gemiddelde temperatuurverhoging.

Literatuur

- Blokker, E. J. M. en Pieterse-Quirijns, E. J. (2013) Modeling temperature in the drinking water distribution system. Journal - American Water Works Association, 105(1), E19-E29.
- Blokker, E.J.M. en Pan, Q. (2022) Invloed van warmtenetten op drinkwatertemperatuur – inzicht in onderlinge afstanden. KWR 2022.121; KWR Water Research Institute, Nieuwegein.
- Blokker, E.J.M., Pan, Q. en van Laarhoven, K.A. (2024) Validation of an Enhanced Drinking Water Temperature Model during Distribution. Water 16(19), 2796; <https://doi.org/10.3390/w16192796>.
- Enexis (2026) Persoonlijke communicatie met projectgroeplid Jos Meijerink op 10 juli 2026.
- Kaptein, J. (2026) Betrouwbaarheid van elektriciteitsnetten in Nederland: resultaten 2025. KR-2026-03001; Krado, Utrecht.
- Muis, P. van Wijk, C., Creighton, R. van Velsen, A., Rensing, J. en Nauta, S. (2024) Using continuous in situ measurements to probe the diverse thermal dynamics of MVAC & HVAC power cables. The Paris Session 2024, CIGRE, Paris.
- Phase to phase (2026) Netten voor distributie van elektriciteit. Geraadpleegd op 8 juli 2026 op <https://www.phasetophase.nl/boek/index.html>.
- Rossman, L. A. (2000). EPANET 2 user manual, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati. EPA/600/R-00/057.
- Shang, F. en Uber, J. G. (2008). EPANET Multi-species extension user's manual, EPA, Cincinnati, OH. EPA/600/S-07/021.
- van Esch, J. (2022) Engine - BTM+ Model and Expert Tool. 11205555-006-GEO-0001-v2-engine; Deltares, Delft.
- van Summeren, J.R.G. en Zeidan, M. (2024) Een rekenmodel voor de drinkwatertemperatuur in leidingen in warme stadsbodems. BTO 2024.027; KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

I. Inventarisatie van toekomstige kabelinfrastructuurklassen

Deze bijlage bevat (een naar het Nederlands vertaalde versie van) de door de netbeheerders aangeleverde beschrijving van de verschillende casussen die in deze studie zijn gemodelleerd, inclusief de geometrieën van de casussen en de kenmerken van de elektriciteitskabels die in elke casus zijn betrokken.

De casussen zijn bedoeld om typische scenario's te vertegenwoordigen waarin elektriciteitskabels van kabeldistributienetten en waterleidingen dicht bij elkaar worden aangelegd. Deze scenario's weerspiegelen veelvoorkomende infrastructuurconfiguraties in Nederland. Alle casussen zijn gebaseerd op greenfieldsituaties (nieuwbouw), waarin geen bestaande ondergrondse infrastructuur aanwezig is. Hoogspanningskabelinstallaties vallen buiten de scope van deze studie en worden daarom niet beschouwd.

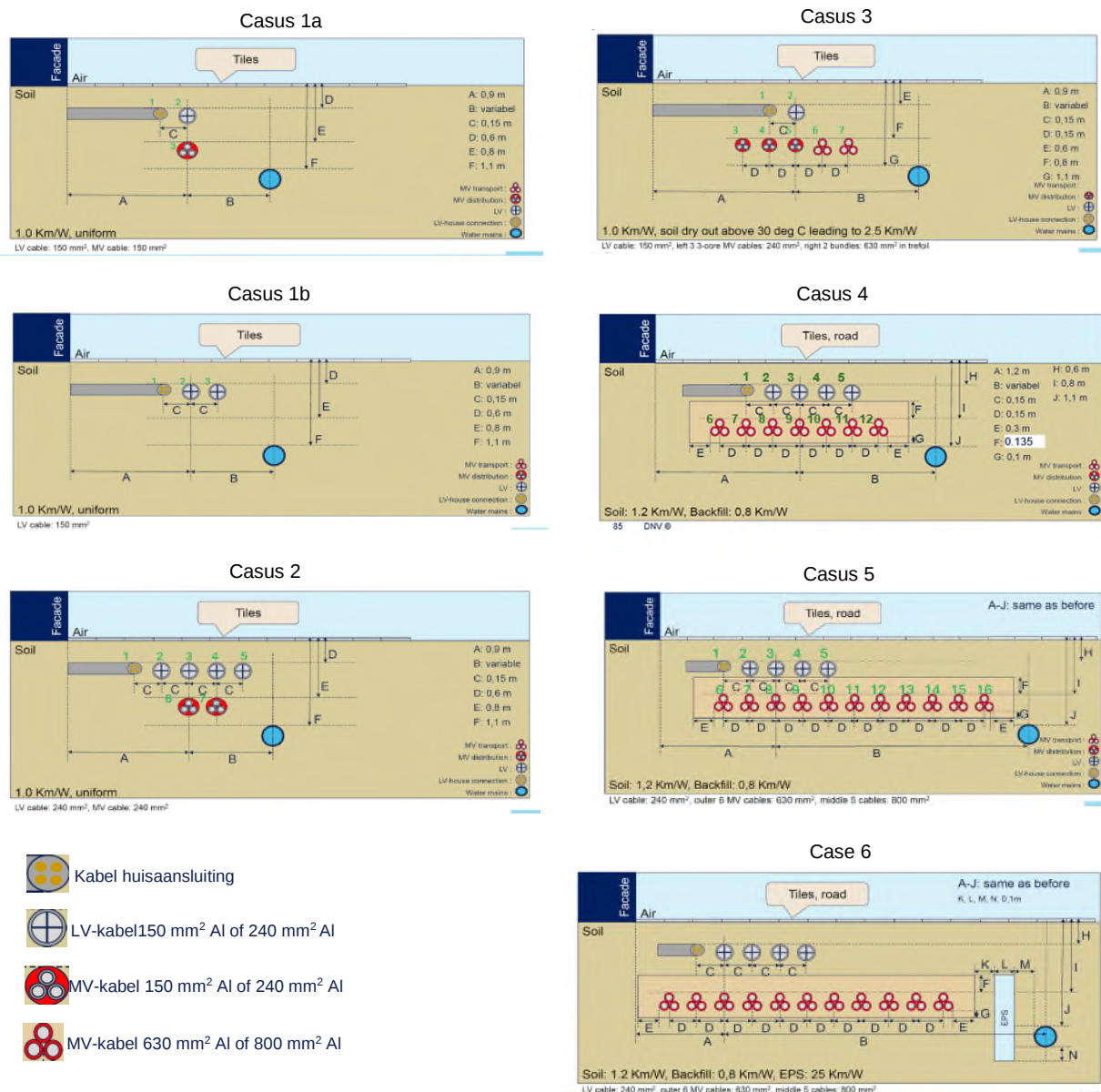
De beschouwde casussen waren de volgende:

- casus 1 (KIK 1): situatie in een kleine straat in een woonwijk;
- casus 2 (KIK 2): situatie in een normale straat in een woonwijk;
- casus 3 (KIK 3): situatie in een straat die elektriciteit en water het gebied in of door het gebied voert;
- casus 4 (KIK 4): situatie in een industriegebied waar substantiële vermogens worden verdeeld;
- casus 5 (KIK 5): situatie nabij een transformatorstation;
- casus 6: situatie nabij een transformatorstation met maatregelen om de warmtestroom te beperken.

De casussen zijn weergegeven in Figuur 36, waarin het kabeltype, de locatie van de kabels en waterleidingen en de bodemweerstand zijn weergegeven.

De beschouwde kabels zijn als volgt:

- Huisaansluitkabel: 4x16/16 mm² Cu, XLPE-isolatie.
- LS-kabel 150 mm² Al en 240 mm² Al: kabels met 4 sectorvormige geleiders en een 50 mm² Ceander-schermband, PVC-isolatie.
- MS-kabel 150 mm² Al en 240 mm² Al: 20 kV driekernige kabel met 70 mm² koperdraadschermband, XLPE-isolatie.
- MS-kabel 630 mm² Al en 800 mm² Al: 20 kV eenaderige kabel met 35 mm² koperdraadschermband, XLPE-isolatie.



Figuur 36. Casussen aangeleverd door de netbeheerders.

II. GIS-analyse van kabeldichtheden in Almere en Rijnmond

De percentages voor nabijheid van kabels die in deze studie zijn gebruikt, zijn afgeleid uit twee GIS-analyses die zijn aangeleverd door Alliander en Evides. Samen vormen deze datasets de basis voor het definiëren van zowel het referentiescenario als de gevoeligheidsscenario's die in de stadsbrede analyses zijn gebruikt.

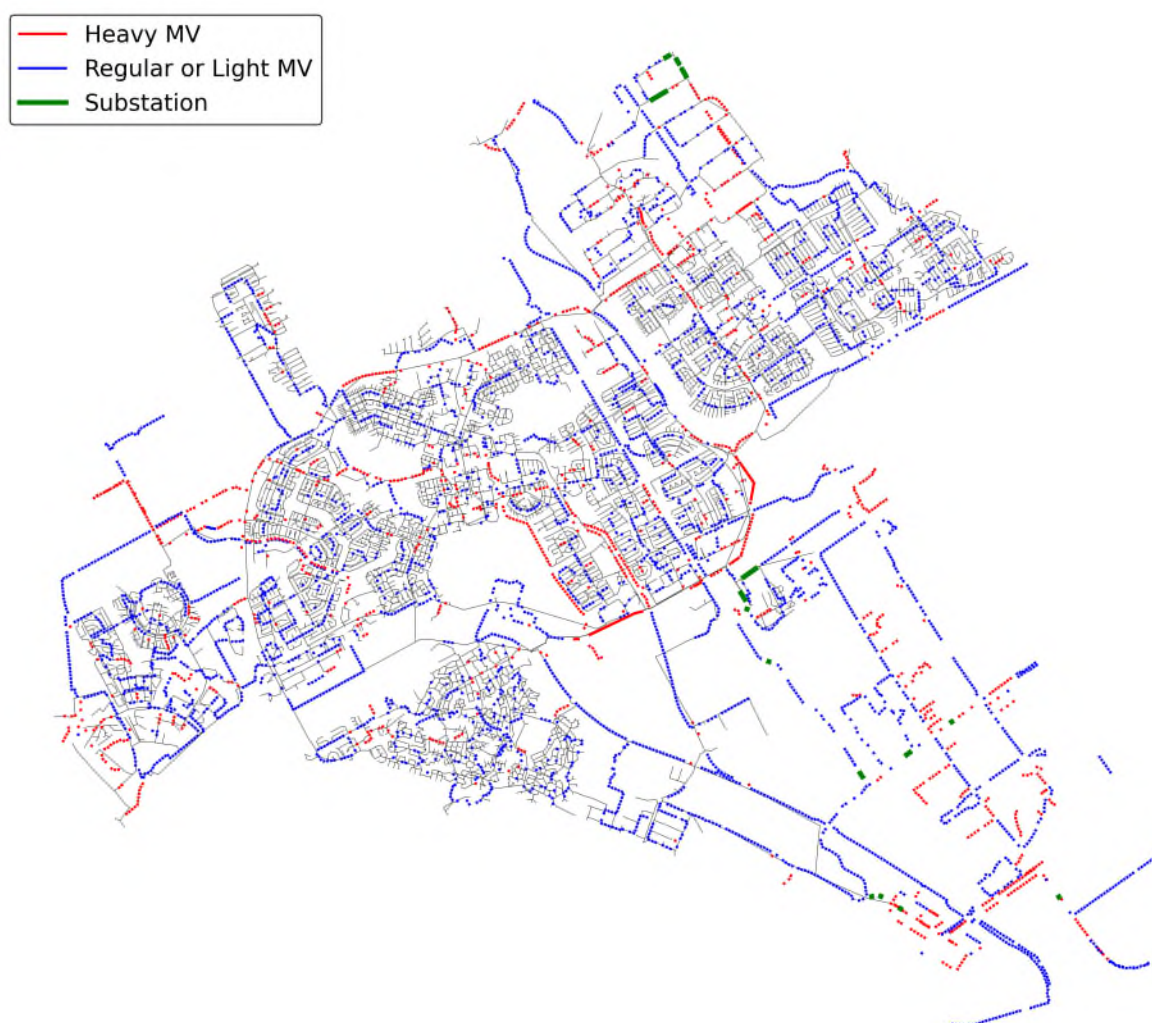
De GIS-analyse van Alliander is gebruikt om de kabelverdelingstabel voor het referentie-/basisscenario van Almere op te stellen (Tabel 7). In de analyse is nabijgelegen elektriciteitsinfrastructuur ingedeeld naar leidingdiameterklasse en kabeltype. Figuur 37 toont de ruimtelijke verdeling van ondergrondse elektriciteitskabels in Almere die in deze analyse zijn meegenomen. Verschillende kabeltypen worden met verschillende kleuren onderscheiden, waarmee een overzicht wordt gegeven van de kabelinfrastructuur die is gebruikt om de percentages voor de kabelverdeling af te leiden. Het volgende wordt gevonden:

- 70% van het leidingdistributienet ligt niet nabij een van de MS-kabels die zichtbaar zijn in Figuur 20. Deze leidingen worden verondersteld alleen nabij LS-kabels te liggen (gerepresenteerd door KIK1b zoals beschreven in Paragraaf 2.2.1).
- 21,95% van het distributienet ligt nabij de lichtste klasse middenspanningskabels, die eveneens wordt gerepresenteerd door KIK 1b of KIK 1a (zie ook de discussie in Paragraaf 5.5) (blauw in Figuur 37).
- 8,04% van het net ligt nabij zwaardere typen MS-kabels, KIK 2, 3 of 4 (in het model gerepresenteerd met KIK4 zoals beschreven in Paragraaf 2.2.1).
- 0,01% van het net ligt nabij de klasse van kabels die doorgaans uit transformatorstations komen, gerepresenteerd door KIK5.

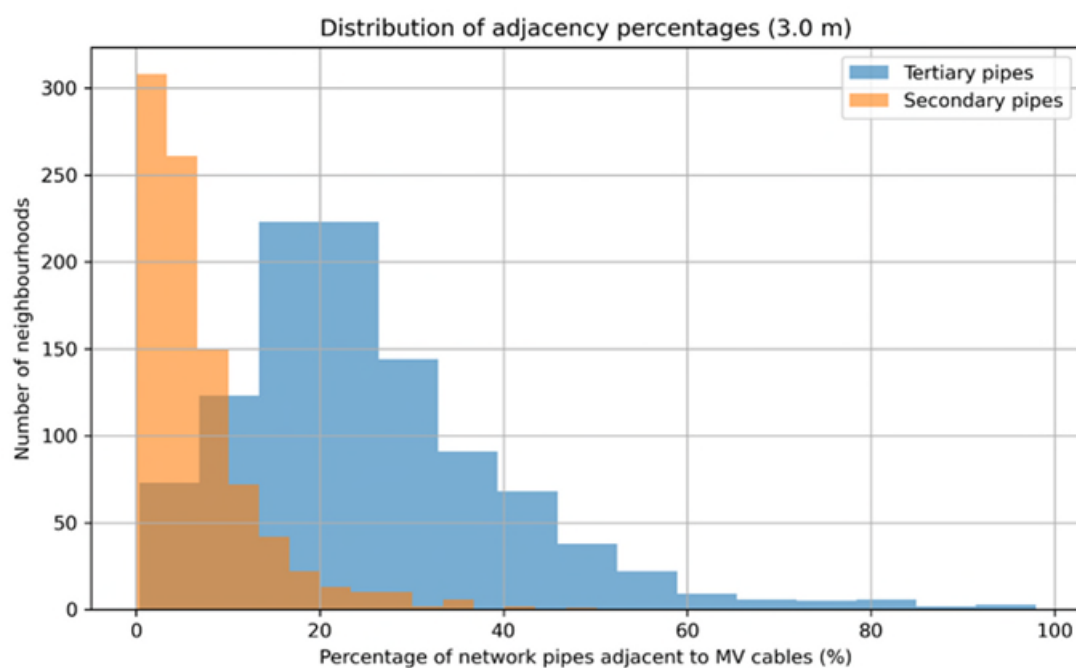
Deze percentages definiëren de referentieverdeling van kabels en zijn gebruikt voor de probabilistische toekenning van kabeltypen aan afzonderlijke leidingen in de stadsbrede analyses.

Omdat de verdeling van elektriciteitskabels per stad verschilt, heeft Evides een GIS-analyse uitgevoerd om realistische bandbreedtes voor kabel-nabijheidspercentages te definiëren. Evides heeft voor 1037 afzonderlijke buurten (CBS) in het Zuid-Hollandse voorzieningsgebied van Evides het percentage drinkwaterleidingen nabij middenspanningskabels aangeleverd. Figuur 38 toont het percentage drinkwaterleidingen dat binnen 3 m van middenspanningskabels ligt voor tertiaire leidingen (kleine diameter: $D < 150$ mm) en secundaire leidingen (middelgrote diameter: $150 \text{ mm} \leq D \leq 250$ mm). Voor secundaire leidingen varieert het percentage nabijgelegen MS-kabels van ongeveer 0% tot 35%, terwijl de waarden voor tertiaire leidingen variëren van ongeveer 0% tot 60%, waarbij de meeste buurten tussen 10% en 40% liggen en enkele uitschieters dicht bij 100% voorkomen (dit zijn uitschieters die overeenkomen met onbewoonde 'buurten' waarin alleen enkele kabels en leidingen gezamenlijk een groot waterlichaam kruisen).

Deze resultaten laten zien dat de nabijheid tussen kabels en leidingen aanzienlijk varieert tussen de verschillende stadsdelen en dorpen in het voorzieningsgebied van Evides. Deze uitkomsten leidden tot de bandbreedtes voor kabeldichtheden die in de stadsbrede analyses zijn beschouwd, zoals toegelicht in Paragraaf 5.3.2.

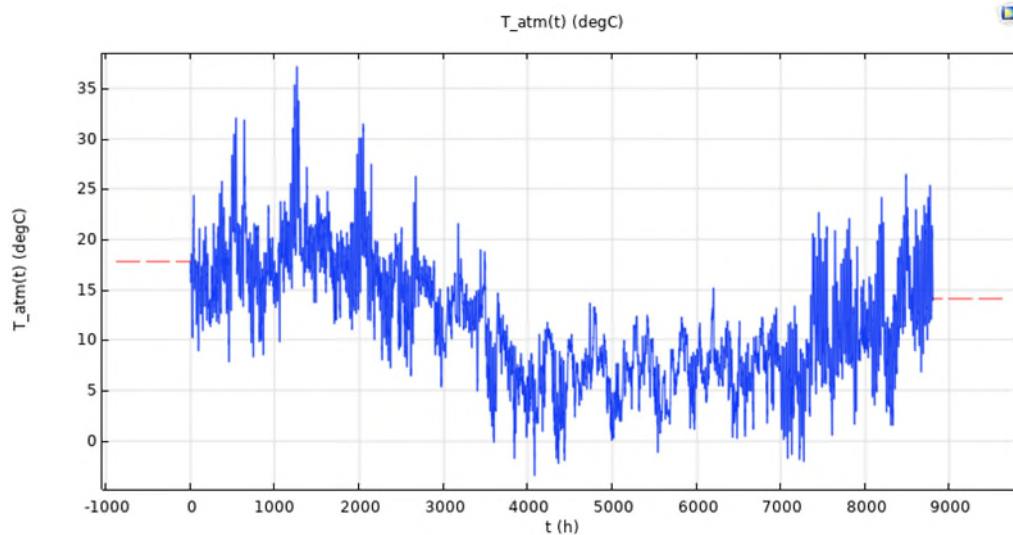


Figuur 37. Ruimtelijke verdeling van kabelinfrastructuurklassen in Almere. De grijze lijnen geven het leidingnet weer. De stippen komen overeen met kabels. Blauw komt overeen met KIK1, rood komt overeen met KIK 2, 3 en 4, groen komt overeen met KIK 5. Het grootste deel van de leidingen ligt niet in de buurt van een middenspanningskabel.

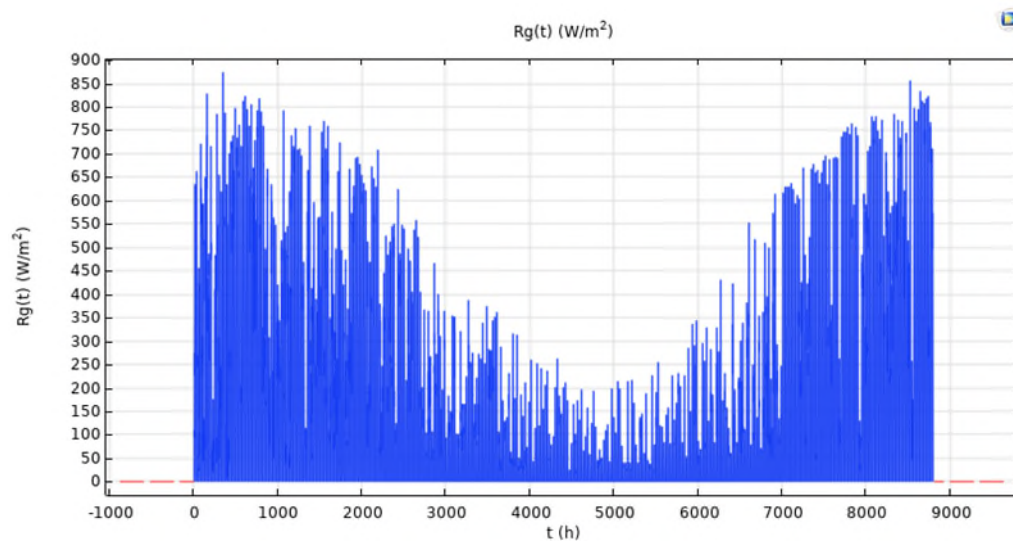


Figuur 38. Verdeling van het percentage distributieleidingen dat een MV-kabel binnen 3 m heeft liggen in verschillende CBS buurten in het voorzieningsgebied Rijnmond. Tertiary pipes betreft de leidingen met een diameter kleiner dan 150 mm, secondary pipes betreft de leidingen met een diameter van 150 t/m 250 mm.

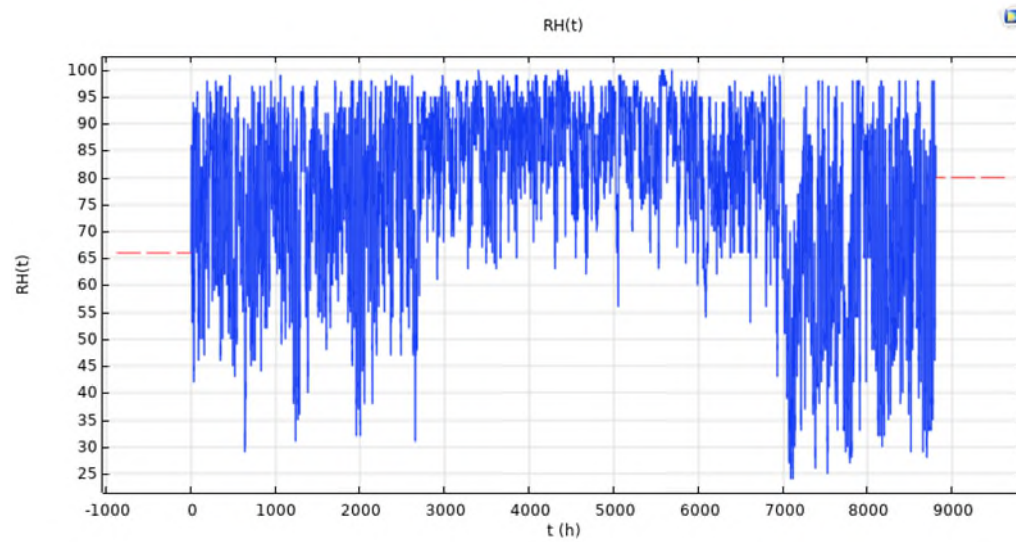
III. Tijdreeksen van de gebruikte klimaatdata in de modelstudie



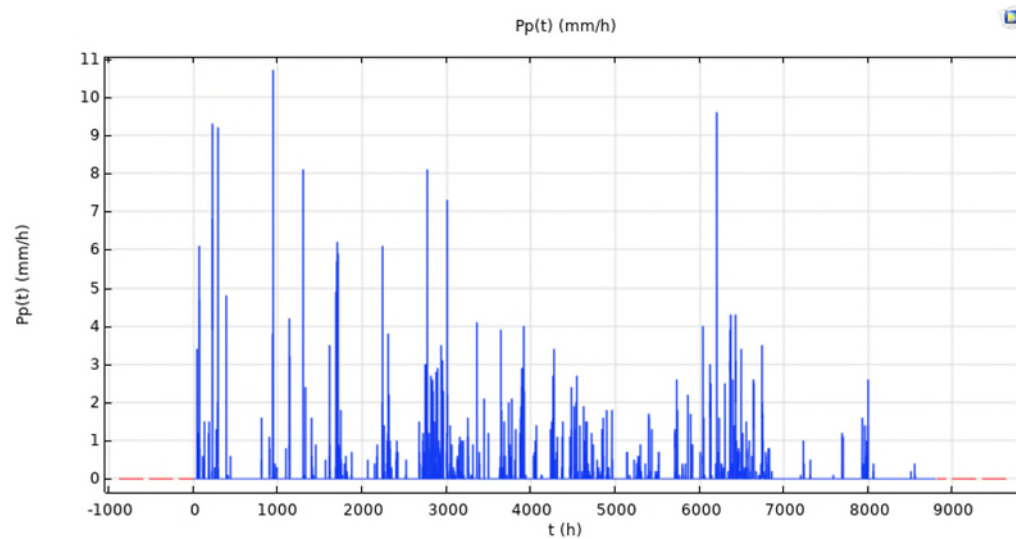
Figuur 39. Atmosferische temperatuur.



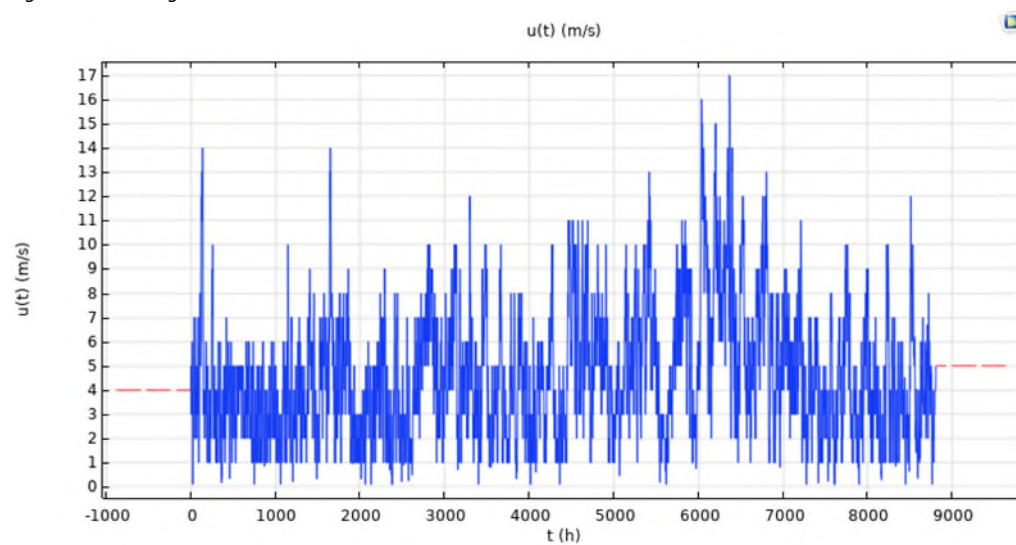
Figuur 40. Instraling met korte golflengte.



Figuur 41. Relatieve luchtvochtigheid.



Figuur 42. Neerslag.



Figuur 43. Windsnelheid.

IV. Berekende warmteverliezen per kabel

Tabel 13. Warmteverliezen per kabel wanneer er een utilisatiefactor wordt meegenomen in de belasting.

KIK en kabel	Circuit #	Diameter (opzet) [mm]	Diameter (gebruikt) [mm]	Warmtebron [W/m] @ 90 C	Warmtebron [W/m] @ 70 C
1a	1	17,5	17,50	0,9899	
1a	2	52,7	52,70		0,8110
1a	3	68,6	68,60	1,2850	
1b	1	17,5	17,50	0,9900	
1b	2-3	52,7	52,70		0,5892
2	1	17,5	17,50	0,9900	
2	2-5	63,2	63,20		0,4370
2	6-7	77,2	77,20	0,9980	
3	1	17,5	17,50	0,5320	
3	2	52,7	52,70		0,5030
3	3-5	77,2	77,20	0,7730	
3	6-7	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	0,7360	
4	1	17,5	17,50	0,8622	
4	2-5	63,2	63,20		0,3891
4	6-7	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	0,6184	
4	8-9	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	0,6184	
4	10-12	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	0,9392	
5	1	17,5	17,50	0,8620	
5	2-5	63,2	63,20		0,3824
5	6-8	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	1,4700	
5	9-10	$54,9 \cdot \sqrt{3}$	95,09	0,7399	
5	11-13	$54,9 \cdot \sqrt{3}$	95,09	1,1454	
5	14-16	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	1,5124	

Tabel 14. Warmteverliezen per kabel wanneer er geen utilisatiefactor wordt meegenomen in de belasting.

KIK en kabel	Circuit #	Diameter (opzet) [mm]	Diameter (gebruikt) [mm]	Warmtebron [W/m] @ 90 C	Warmtebron [W/m] @ 70 C
1a	1	17,5	17,50	3,7000	
1a	2	52,7	52,70		3,1460
1a	3	68,6	68,60	4,5850	
1b	1	17,5	17,50	3,7000	
1b	2-3	52,7	52,70		2,3350
2	1	17,5	17,50	3,7000	
2	2-5	63,2	63,20		1,6910
2	6-7	77,2	77,20	3,4720	
3	1	17,5	17,50	2,1300	
3	2	52,7	52,70		2,0900
3	3-5	77,2	77,20	2,6500	
3	6-7	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	2,2500	
4	1	17,5	17,50	3,7000	
4	2-5	63,2	63,20		1,5820
4	6-7	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	1,8610	
4	8-9	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	1,8610	
4	10-12	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	3,1000	
5	1	17,5	17,50	3,4490	
5	2-5	63,2	63,20		1,5290
5	6-8	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	5,2700	
5	9-10	$54,9 \cdot \sqrt{3}$	95,09	2,2770	
5	11-13	$54,9 \cdot \sqrt{3}$	95,09	3,8630	
5	14-16	$50,4 \cdot \sqrt{3}$	87,30	5,4000	