



Scenariostudies voor beperken invloed klimaatveranderingen op temperatuur en kwaliteit drinkwater in het net

Kwantificeren van scenario's m.b.t. koelen, aanpassen ontwerp en beter doorstromen van het leidingnet

KWR 2012.017
Januari 2012

KWR

Watercycle Research Institute

Scenariostudies voor beperken invloed klimaatveranderingen op temperatuur en kwaliteit drinkwater in het net

Kwantificeren van scenario's m.b.t. koelen, aanpassen ontwerp en beter doorstromen van het leidingnet

KWR 2012.017
Januari 2012

© 2011 KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag 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, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Colofon

Titel

Scenariostudies voor beperken invloed klimaatveranderingen op temperatuur en kwaliteit drinkwater in het net

Opdrachtnummer

A308813

Onderzoeksprogramma(`s)

DPW Infrastructuur

Projectmanager

E.J. Pieterse-Quirijns

Opdrachtgever

DPW-bedrijven

Kwaliteitsborger(s)

J.H.G. Vreeburg

Auteur(s)

E.J.M. Blokker en E.J. Pieterse-Quirijns

Verzonden aan

Dit rapport is niet openbaar en slechts verstrekt aan de opdrachtgevers van het contractonderzoek-project. Eventuele verspreiding daarbuiten vindt alleen plaats door de opdrachtgever zelf.

Samenvatting

Volgens het Drinkwaterbesluit mag de temperatuur van het drinkwater op het leveringspunt niet hoger zijn dan 25°C. Sporadisch worden in het distributienet echter temperaturen gemeten boven deze toegestane 25°C. De verwachting is dat als gevolg van klimaatveranderingen deze overschrijding vaker zal optreden. Hierdoor is het gewenst om inzicht te hebben in mogelijke oplossingen. Deze oplossingen kunnen gericht zijn op het voorkomen van overmatige opwarming van het drinkwater in het distributienet of het beperken van de nadelige invloed van hoge temperaturen op de kwaliteit van het drinkwater, door het beperken van de nagroei van micro-organismen.

Het doel van dit DPW-project is om een aantal mogelijke oplossingen voor hoge temperaturen in het distributienet nader te onderzoeken door middel van scenariostudies. Hiermee kunnen waterbedrijven tijdens warme perioden onderbouwd maatregelen nemen en bovendien preventieve maatregelen nemen bij de aanleg van nieuwe leidingen.

De mogelijke oplossingen zijn onderzocht met behulp van het temperatuurmodel, dat door KWR in het BTO Waterdistributie is ontwikkeld. Het temperatuurmodel bestaat uit een "bodem" model en een "water" model. Het bodemmodel beschrijft de opwarming van de bodem dat de drinkwaterleiding omringt, afhankelijk van weersomstandigheden en bodemeigenschappen. Het watermodel beschrijft de opwarming van het water op verschillende locaties in het distributienet afhankelijk van de temperatuur van de buitenwand van de leiding, de leidingeigenschappen, zoals leidingmateriaal en wanddikte en stromingseigenschappen van het water. In het watermodel is (voor het eerst) een vereenvoudigd groeimodel meegenomen voor twee fictieve micro-organismen (m.o.), één met een optimale groeisnelheid van 25°C (m.o. I) en één met een optimale groeisnelheid van 37°C (m.o. II). Hiermee kan een indruk worden gekregen van de nagroei van bacteriën op iedere locatie.

De mogelijke oplossingen zijn gedefinieerd binnen vier thema's:

1. Koelen, waarbij zowel gekeken wordt naar de plaats van koelen (af pompstation, gehele leidingnet, een wijk of een straat), als de mate van koelen (2°C - 10°C).
2. Ontwerpeisen aanpassen, waarbij gekeken is naar de aanlegseisen (diepteligging, bodembedekking, vegetatie, grondsoort) en naar de keuze van het leidingmateriaal (isoleren, dikwandig materiaal, kleinere diameters).
3. Beïnvloeden van verblijftijd, waarbij gekeken wordt naar maatregelen om de verblijftijd te verlagen door het verbruik te verhogen.
4. Beïnvloeden van externe en omgevingsfactoren, waarbij gekeken is naar de wettelijke eisen voor de afstand tussen warmtebron en leidingnet.

De resultaten op basis van de scenariostudies zijn onderverdeeld in maatregelen die effect hebben op de temperatuur van het drinkwater en maatregelen die effect hebben op de microbiële nagroei.

Maatregelen die effect hebben op de *temperatuur* van het drinkwater zijn in afnemende effectiviteit:

1. Koelen van de bodem in het hele net; lokaal koelen kan lokaal nut hebben. De opwarming van de bodem (ter plekke van de leidingen) kan worden beperkt door
 - a. vegetatie aan te brengen langs het tracé;
 - b. de leidingen dieper te leggen;
 - c. door zand te vermijden.
2. Gebruik van isolerende leidingmaterialen (PVC, eventueel met grotere wanddikte).
3. In een PVC leidingnet: verkorten van de verblijftijd (max dag).

De leidingdiameter heeft geen invloed op de temperatuur. Het koelen af pompstation heeft effectief geen invloed op de temperatuur aan de tap.

Er bestaan goede richtlijnen voor de afstand tussen warmtebron en leidingnet, zoals voor stadverwarming en meterkast. Bij naleving van de richtlijnen zal onnodige opwarming door de externe warmtebronnen worden voorkomen.

Maatregelen die effect hebben op de *nagroe*i van de virtuele m.o. I en II in het drinkwater zijn in afnemende effectiviteit:

1. verkleinen van de diameter, waardoor de verblijftijd wordt verkort.
2. genereren van extra verbruik, waardoor de verblijftijd wordt verkort (10% over de gehele dag is vele malen effectiever dan 5% extra dagverbruik in de nacht of lokaal 15-30% extra verbruik);
3. koelen af pompstation van het ingaande water: dit is afhankelijk van de temperatuur, de groeicurve en temperatuurafhankelijkheid van het m.o. en de isolatie (heeft alleen nut in PVC-net, niet in gietijzer);
4. koelen van de bodem, in het hele net; lokaal koelen heeft zeer beperkt effect;

Zelfreinigende netten met kleine diameters zijn dus ook gunstig in het beperken van de *nagroe*i van m.o.

Op basis van de uitkomsten van de scenariostudies kunnen praktische maatregelen worden opgesteld voor de ontwerp-, aanleg- en beheerfase van het leidingnet, die ervoor zorgen dat overmatige opwarming en de invloed ervan op *nagroe*i zoveel mogelijk worden beperkt.

Inhoud

Samenvatting	1
Inhoud	3
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding en doel	7
1.2 Aanpak	7
1.2.1 Temperatuur en nagroei	7
1.2.2 Vaststellen van de oplossingsmogelijkheden	8
1.2.3 Uitvoeren van de scenariostudies	8
1.3 Leeswijzer	10
2 Vaststellen uitgangssituatie en beoordelingscriteria	11
2.1 Uitgangssituatie en beoordelingscriterium voor bodemmodel	11
2.1.1 Uitgangssituatie bodemmodel	11
2.1.2 Beoordelingscriterium bodemmodel	12
2.2 Uitgangssituatie en beoordelingscriterium voor watermodel	12
2.2.1 Uitgangssituatie watermodel	12
2.2.2 Beoordelingscriterium watermodel	13
2.2.3 Groeimodel m.o. in watermodel	13
2.2.4 Almere als modelwijk voor het watermodel	15
3 Scenario's voor het watermodel	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Overzicht van de scenario's	17
3.3 Beschrijving locaties bij de scenario's met lokale maatregelen	19
3.4 Temperatuur af pompstation	20
3.5 Temperatuur van de wand	21
3.6 Leidingmateriaal	21
3.7 Wanddikte	21
3.8 Leidingdiameter	22
3.9 Verblijftijd beïnvloeden door verbruik aan te passen	23
3.9.1 Verbruik in de Danswijk (wijk 1)	24
3.9.2 Verbruik in de Muziekwijk (wijk 2)	25
4 Resultaten scenario's watermodel (GGIJ)	27
4.1 Scenario 0: uitgangssituatie met GGIJ	27
4.2 Maatregelen op het gehele leidingnet	29
4.3 Maatregelen op wijkniveau	32
4.4 Maatregelen op straatniveau	33
4.5 Vergelijken van alle maatregelen op lokaal niveau	33

5	Resultaten scenario's watermodel (PVC)	37
5.1	Scenario 7a: uitgangssituatie PVC	37
5.2	Maatregelen op het gehele leidingnet	39
5.3	Maatregelen op wijkniveau	42
5.4	Maatregelen op straatniveau	43
5.5	Vergelijken van maatregelen op lokaal niveau	43
5.6	Scenario 15+	45
6	Scenario's voor het bodemmodel	49
6.1	Inleiding	49
6.2	De bodemtemperatuur in de uitgangssituatie van het bodemmodel	50
6.3	Scenario's voor albedo	51
6.3.1	Ontwikkeling van de scenario's voor albedo	51
6.3.2	Resultaten van de scenario's voor albedo	51
6.4	Scenario's voor grondsoort	54
6.4.1	Ontwikkeling van de scenario's voor grondsoort	54
6.4.2	Resultaten van de scenario's voor grondsoort	57
6.4.3	Resultaten van de scenario's voor een combinatie van albedo en grondsoort	60
6.5	Scenario's voor vegetatie	60
6.5.1	Ontwikkeling van de scenario's voor vegetatie	60
6.5.2	Resultaten van de scenario's voor vegetatie	60
7	Scenario's wetgeving	63
7.1	Inleiding	63
7.2	Richtlijnen stadsverwarming of andere warmtebronnen	63
7.3	Richtlijnen meterkast	64
7.4	Ervaringen bedrijven	65
7.4.1	Dunea	65
7.4.2	PWN	65
7.4.3	Waternet	66
8	Samenvatting en discussie	67
8.1	Inleiding	67
8.2	Temperatuur van bron tot tap	67
8.2.1	Temperatuur vanaf productie en in transportleidingen	67
8.2.2	Temperatuur in het distributienet	69
8.2.3	Temperatuur in de aansluitleidingen	69
8.2.4	Temperatuur in de binneninstallatie	69
8.3	Groei van m.o. onder invloed van de temperatuur	69
8.4	Resultaten scenariostudies naar oplossingen voor hoge temperaturen in het leidingnet	69
8.4.1	Inleiding	69
8.4.2	Effect van koelen	70
8.4.3	Effect van het aanpassen van ontwerpeisen: aanpassen van leidingmateriaal	74
8.4.4	Effect van het aanpassen van ontwerpeisen: aanpassen van aanleg van leidingnet	76
8.4.5	Beïnvloeden van de verblijftijd: genereren van extra verbruik	78

9	Conclusies en aanbevelingen	81
9.1	Algemeen	81
9.2	Verlagen van de drinkwatertemperatuur	81
9.3	Beperken van de nagroei van m.o.	81
9.4	Praktische aanbevelingen: maatregelen in de praktijk	81
9.5	Aanbevelingen voor verder onderzoek	82
10	Literatuur	85
I	Modellen voor groeisnelheid micro-organismen als functie van temperatuur	87

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en doel

Volgens het Drinkwaterbesluit mag de temperatuur van het drinkwater op het leveringspunt niet hoger zijn dan 25°C. Bij hogere temperaturen kunnen verschillende typen micro-organismen (algen, bacteriën, protozoa, schimmels) tot groei komen in het drinkwater of in de biofilm aan de binnenkant van de leiding (bacteriën, protozoa, schimmels).

Sporadisch worden in het distributienet temperaturen gemeten boven de toegestane 25°C (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2010; Pieterse-Quirijns e.a., 2011). Door verdere opwarming als gevolg van klimaatveranderingen zal naar verwachting de overschrijding vaker optreden. Met behulp van klimaatscenario's voor 2050 en 2100 is in een eerder DPW-project aangetoond dat in de toekomst de wettelijke norm van 25°C geregeld wordt overschreden bij de huidige diepteligging van distributieleidingen, namelijk bij 1 meter in zandgrond onder verhard oppervlak (Pieterse-Quirijns e.a., 2011).

Met de te verwachten opwarming van het drinkwater in het leidingnet is het gewenst om inzicht te hebben in mogelijke oplossingen. Deze oplossingen kunnen gericht zijn op het voorkomen van overmatige opwarming van het drinkwater in het distributienet of het beperken van de nadelige invloed van hoge temperaturen van het drinkwater. Binnen DPW-verband heeft in 2010 een brainstormsessie plaatsgevonden rond het thema "hoe kan voorkomen worden dat de temperatuur van het leidingnetwater boven de 25 graden komt" met de volgende partijen: Waternet, Dunea, PWN, Nuon, Ecofys en KWR. De brainstormsessie had een groot aantal ideeën ter voorkoming van de overmatige opwarming van het drinkwater in het distributienet als resultaat. De ideeën varieerden tussen gemakkelijk toepasbaar en bekend, tot moeilijk toepasbaar en innovatief. De vraag is of de ideeën het gewenste effect bewerkstelligen en of ze haalbaar zijn (Vries, 2011).

Het doel van dit DPW-project is om een aantal mogelijke oplossingen voor hoge temperaturen in het distributienet nader te onderzoeken door middel van scenario studies. Met behulp van het temperatuurmodel, dat binnen KWR Waterinfrastructuur is ontwikkeld, kunnen verschillende scenario's doorgerekend worden om de haalbaarheid van oplossingen te bepalen. Hiermee kunnen waterbedrijven tijdens warme perioden onderbouwd maatregelen nemen en bovendien preventieve maatregelen nemen bij de aanleg van nieuwe leidingen.

1.2 Aanpak

1.2.1 Temperatuur en nagroei

De wettelijke eis van 25 °C geldt aan het verbruikspunt. In eerdere studies is al aangetoond dat in warme zomers de temperatuur van 25 °C overschreden wordt. De wettelijke eis hangt samen met de microbiologische waterkwaliteit, maar is niet hard onderbouwd. Naast de eis aan de temperatuur is derhalve ook van belang in hoeverre door de verhoogde temperatuur de microbiologische waterkwaliteit wordt beïnvloed. Naar verwachting is het erger dat het drinkwater gedurende 24 uur een temperatuur boven de 25 °C heeft dan wanneer het gedurende 20 uur een temperatuur van 10 °C heeft en gedurende slechts 4 uur boven de 25 °C.

In deze studie worden twee wegen bewandeld:

1. hoe kan de temperatuur van het drinkwater worden beperkt?
2. hoe kunnen de effecten van een verhoogde temperatuur van het drinkwater worden beperkt?
Voor deze stap wordt gerekend met een groeimodel van fictieve micro-organismen (m.o.) waarvan de groei alleen van de temperatuur afhangt.

1.2.2 Vaststellen van de oplossingsmogelijkheden

In dit DPW-project worden mogelijke oplossingen voor hoge temperaturen in het distributienet nader onderzocht door middel van scenariostudies. De oplossingen kunnen betrekking hebben op het verlagen van de temperatuur in het distributienet of het beperken van de invloed van hogere temperaturen in het distributienet, door het beperken van de nagroei van micro-organismen.

Door de drie DPW-bedrijven zijn vier oplossingsthema's gedefinieerd waarbinnen scenariostudies uitgevoerd worden:

1. koelen

Binnen het thema koelen wordt gekeken naar:

- *waar* koelen: (a) pompstation, (b) wijkniveau (eind transportleiding), (c) straatniveau
- *verband* tussen tijdsduur en temperatuur. De ingaande temperatuur af pompstation heeft geen invloed op de uiteindelijke temperatuur van het drinkwater, maar wel op de tijdsduur dat een hoge temperatuur aanwezig is in het leidingnet (en de binneninstallatie). Wat is de invloed van een langere tijdsduur van de hoge temperatuur op de ontwikkeling van de waterkwaliteit? De groeisnelheid van bacteriën bij verschillende temperaturen is hierbij van belang.

2. aanpassen ontwerpeisen

Binnen het thema aanpassen van de ontwerpeisen wordt gekeken naar:

- ontwerpeisen in aanleg zoals diepteligging, bodemsoort, lommerrijke omgeving, wit verven van het straatoppervlak.
- ontwerpeisen in materiaalkeuzes: isoleren, dubbelwandige materialen, kleinere diameter van leidingen.

3. verblijftijd beïnvloeden

Het verkorten van de verblijftijd zal zowel invloed hebben op de temperatuur van het drinkwater in het leidingnet als op de groei van micro-organismen. Binnen dit thema wordt gekeken naar:

- verlagen van de verblijftijd door waterverbruik te verhogen, zoals door stimuleren huishoudelijk waterverbruik (max dag), door lokaal extra te spuien, door het nachtverbruik te verhogen;
- het aanpassen van de leidingdiameter beïnvloedt de verblijftijd ook.

4. externe of omgevingsfactoren beïnvloeden

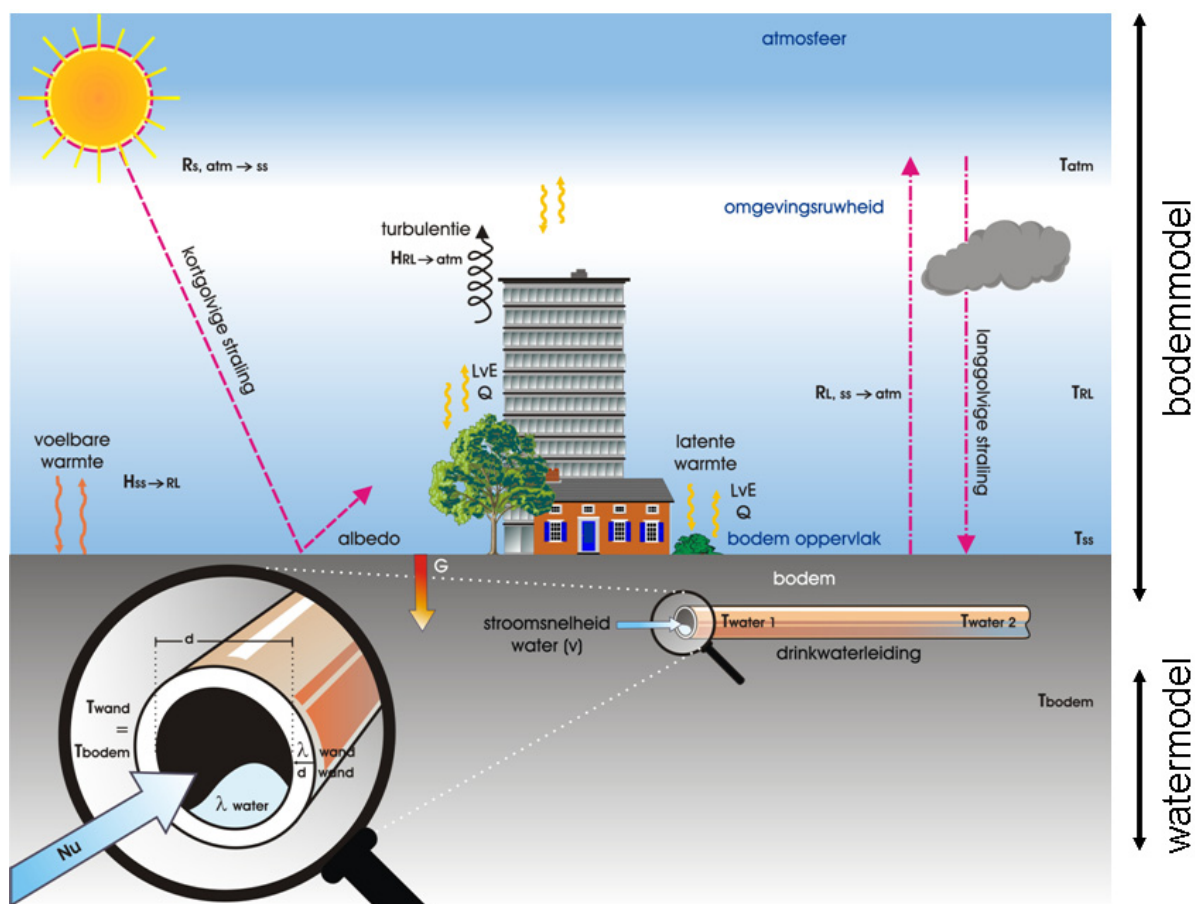
Binnen het thema externe of omgevingsfactoren beïnvloeden wordt gekeken of er wettelijke eisen bestaan voor de afstand tussen warmtebron en leidingnet (bv stadsverwarming, meterkast).

1.2.3 Uitvoeren van de scenariostudies

Voor het doorrekenen van de scenario's wordt gebruik gemaakt van het temperatuurmodel dat binnen KWR Waterinfrastructuur is ontwikkeld. Met dit model kan de temperatuur van het drinkwater in het distributienet berekend worden als functie van weersomstandigheden, omgevings eigenschappen en leiding- en stromingseigenschappen. Dit model is uitvoerig beschreven in rapporten en artikelen (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2010 en 2011; Pieterse-Quirijns e.a. 2011).

In Figuur 1-1 is het temperatuurmodel schematisch weergegeven. Het drinkwater dat door een leiding in de grond stroomt wordt 's zomers opgewarmd doordat de omringende bodem door hoge temperaturen en zonnestraling in de atmosfeer warmer is geworden. Zonnestraling en hoge temperaturen in de atmosfeer zorgen voor de opwarming van het asfalt of de grondbedekking. Wanneer begroeiing aanwezig is, zal door verdamping (latente warmte) de bodem minder snel opwarmen. Vervolgens wordt door geleiding de warmte doorgegeven naar diepere delen in de bodem. Als de warmte door de bodem is doorgedrongen tot aan de buitenwand van de waterleiding, wordt eerst de warmte via geleiding door de buiswand getransporteerd. Vervolgens komt de warmte in het leidingwater. Door convectie wordt de warmte in het leidingwater getransporteerd en stijgt de temperatuur. Het model dat de opwarming van het drinkwater onder invloed van weersomstandigheden, bodemeigenschappen en leiding- en stromingseigenschappen beschrijft, kan worden onderverdeeld in een bodemmodel en een watermodel:

- Het bodemmodel beschrijft de opwarming van de bodem dat de drinkwaterleiding omringt, afhankelijk van weersomstandigheden en bodemeigenschappen (in MATLAB®).
- Het watermodel beschrijft de opwarming van het water op verschillende locaties in het distributienet afhankelijk van de temperatuur van de buitenwand van de leiding, de leidingeigenschappen, zoals leidingmateriaal en wanddikte en stromingseigenschappen van het water (in EPANET). Binnen het watermodel kan in EPANET een groeimodel voor micro-organismen



Figuur 1-1 Schematische weergave van de opwarming van het water in een leiding onder invloed van weersomstandigheden en omgeving (kortgolvlige en langgolvlige straling, turbulentie door wind en omgevingsruwheid, verdamping door vegetatie), bodemeigenschappen (warmtegeleiding en warmteoverdracht) en leiding- en stromingseigenschappen (warmtegeleiding en -overdracht van leidingmateriaal en stroomsnelheid).

bij verschillende temperaturen opgenomen worden. Hiermee kan de nagroei van bacteriën op iedere locatie berekend worden. De ontwikkeling van dit groeimodel wordt beschreven in hoofdstuk 2.

In de twee modellen zijn een groot aantal variabelen en parameters aanwezig. Aan sommige kan niets veranderd worden, zoals de weersomstandigheden (straling, wind en temperatuur). Andere kunnen aangepast of veranderd worden, waardoor ze toegepast kunnen worden in een maatregel binnen de oplossingsthema's. Factoren, die gevarieerd kunnen worden zijn:

- Watermodel:
 - temperatuur af pompstation;
 - temperatuur van de leidingwand (door beïnvloeding van de bodemtemperatuur);
 - warmteoverdrachtscoëfficiënt van de leidingwand (afhankelijk van het leidingmateriaal en wanddikte);
 - stroomsnelheid;
 - contacttijd (verblijftijd), dit is een afgeleide parameter, te beïnvloeden door aanpassen leidingdiameter en stroomsnelheid;
 - de leidingdiameter, deze beïnvloedt zowel direct de temperatuuroverdracht door het volume van het water, als ook indirect door de invloed op wanddikte, stroomsnelheid en contacttijd.
- Bodemmodel:
 - albedo van de grondafdekking;
 - wel of geen vegetatie;

- warmtegeleidingscoëfficiënt, warmtecapaciteit en dichtheid van de grond (afhankelijk van de grondsoort);
- diepteligging van de leidingen.

De oplossingen binnen de vier gekozen thema's grijpen in op één van de twee modellen van Figuur 1-1. Bijvoorbeeld het koelen van het drinkwater grijpt in op de temperatuur van het water dat het distributienet ingaat of op de watertemperatuur op verschillende locaties van het distributienet in het watermodel. Het veranderen van de diepteligging, grondsoort of reflectie van het oppervlak grijpt in op het bodemmodel. Een maatregel die aangrijpt op het bodemmodel kan een oplossing zijn voor het verlagen van de temperatuur in het distributienet. Een maatregel die aangrijpt op het watermodel kan zowel leiden tot het verlagen van de temperatuur in het distributienet als het beperken van de invloed van hogere temperaturen in het distributienet, door het beperken van de nagroei van m.o.

Voor de oplossingen binnen de vier thema's zijn scenariostudies ontwikkeld. Omdat een oplossing ingrijpt op één van de twee onderdelen van het temperatuurmodel, vindt de specifieke formulering/invulling van de scenario's per model plaats en niet per thema. In Tabel 1-1 is elk thema gekoppeld aan het betrokken onderdeel van het temperatuurmodel en het hoofdstuk waarin het beschreven wordt.

Tabel 1-1 Overzicht van thema's voor oplossingen van hoge temperaturen in het distributienet gekoppeld aan het bijbehorende onderdeel van het temperatuurmodel en de hoofdstukken waarin het onderdeel van het model wordt uitgewerkt.

thema	betrokken onderdeel temperatuurmodel		hoofdstuk
	bodemmodel	watermodel	
koelen			3-5
aanpassen ontwerpseisen			6
			3-5
verblijftijd beïnvloeden			3-5
externe of omgevingsfactoren beïnvloeden	nvt		7

Voor elk onderdeel van het temperatuurmodel, het bodem- en het watermodel, is een standaard uitgangssituatie en beoordelingscriterium gedefinieerd, die dienen als referentie. Voor alle ontwikkelde scenario's wordt met het temperatuurmodel een criterium berekend. Het berekende criterium wordt vergeleken met het criterium van de uitgangssituatie. Op deze manier kan een uitspraak worden gedaan over de effectiviteit van een oplossing voor hoge temperaturen in het distributienet.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden de uitgangssituatie en beoordelingscriteria voor het bodem- en watermodel beschreven. In dit hoofdstuk wordt ook ingegaan op het groeimodel voor micro-organismen bij verschillende temperaturen, dat opgenomen is in het watermodel.

Hoofdstuk 3 tot 5 beschrijven de scenario's en de resultaten behorend bij oplossingen die aangrijpen op het watermodel. In hoofdstuk 6 worden de scenario's, die horen bij oplossingen die aangrijpen op het bodemmodel uitgewerkt. Het thema "externe of omgevingsfactoren beïnvloeden", dat losstaat van het temperatuurmodel, is uitgewerkt in hoofdstuk 7. De lezer die niet geïnteresseerd is in alle details omtrent de scenariostudies kan hoofdstuk 3-7 overslaan.

Hoofdstuk 8 vat de scenariostudies van hoofdstuk 3-7 samen en plaatst deze in perspectief. Dit hoofdstuk is los te lezen zonder de detailkennis uit de voorgaande hoofdstukken. In hoofdstuk 9 wordt afgesloten met een conclusie en praktische aanbevelingen om hoge temperaturen in het drinkwater of de invloed ervan op nagroei te beperken.

N.B. In de figuren is een decimale punt gebruikt; in de tekst is de Nederlandse decimale komma toegepast.

2 Vaststellen uitgangssituatie en beoordelingscriteria

2.1 Uitgangssituatie en beoordelingscriterium voor bodemmodel

2.1.1 Uitgangssituatie bodemmodel

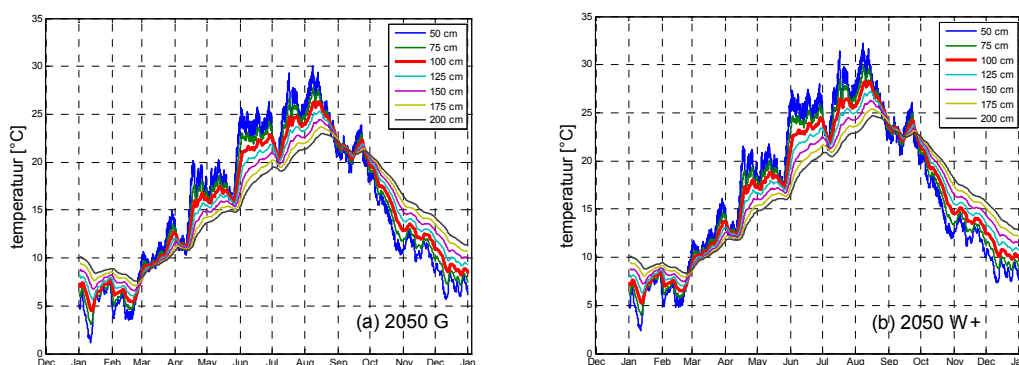
Het bodemmodel heeft als invoer meteorologische gegevens, zoals luchttemperatuur, straling en windsnelheid. Hiervoor kunnen historische gegevens van het KNMI gebruikt worden of weersvoorspellingen. Daarnaast zijn gegevens nodig voor de albedo (de verhouding tussen de hoeveelheid opvallende en gereflecteerde straling, afhankelijk van de grondbedekking), vegetatie, de aanwezigheid van gebouwen, de grondsoort en de diepteligging. In Tabel 2-1 is de uitgangssituatie weergegeven voor het bodemmodel. De uitgangssituatie beschrijft de weersomstandigheden, de bodemeigenschappen en de locatie en diepteligging van de leiding in de bodem, die dienen als referentie.

Tabel 2-1 Uitgangssituatie voor het bodemmodel, binnen de scenario studies voor het onderzoek naar oplossingen voor hoge temperaturen in het distributienet.

Uitgangssituatie van het bodemmodel	
weersomstandigheden	klimaatscenario voor 2050 W+
locatie leiding	platteland
afdekking	stoep
bodemsoort	zand
diepteligging leiding	1 meter

keuze voor weersomstandigheden

In Figuur 2-1 is de te verwachten bodemtemperatuur in 2050 op verschillende dieptes in plattelandomgeving weergegeven volgens het gematigd klimaatscenario en het warm plus scenario (Pieterse-Quirijns e.a., 2011). Volgens het 2050 G scenario (KNMI 2009, Pieterse-Quirijns e.a., 2011) wordt een maximale temperatuur op 1 meter gevonden van 26,3°C, bij het 2050 W+ scenario is deze temperatuur 28,2°C. Om het effect van de oplossingen te bestuderen wordt gekozen voor de worstcase als uitgangssituatie: scenario W+.



Figuur 2-1 Verwachte bodemtemperatuur op verschillende dieptes in 2050 volgens (a) G: gematigd klimaatscenario en (b) W+: warm plus klimaatscenario (Pieterse-Quirijns e.a., 2011).

keuze voor locatie leiding

De meeste aansluitingen voor de DPW-bedrijven liggen in stedelijke omgeving. Wanneer gekeken wordt naar de opwarming van de bodem in stedelijk gebied, dan kunnen twee tegengestelde verschijnselen waargenomen worden:

- 1) In stedelijke omgeving is minder invloed van de wind door de aanwezigheid van gebouwen, waardoor de warmteoverdracht minder snel verloopt (minder convectie) en dus de bodemtemperatuur minder snel zal stijgen.

Bij de snelheid waarmee het grondoppervlak opwarmt speelt de zogenaamde omgevingsruwheid (z_0 zie Figuur 1-1) een grote rol. Bij een hoge windsnelheid warmt het grondoppervlak sneller op. z_0 bepaalt de gemiddelde horizontale windsnelheid dichtbij de grond. Wanneer er meer mogelijkheid is tot invloed van wind aan de bodem (z_0 is klein), dan is de opwarming effectiever. Wanneer veel gebouwen en hoge bomen aanwezig zijn, die de invloed van de wind verlagen, is de opwarming minder snel. Tevens zullen de hoge gebouwen een effect hebben op de windpatronen. In stedelijke omgeving is de opwarming (en ook de afkoeling) onder invloed van de wind dus minder effectief dan op het platteland.

- 2) In stedelijke omgeving wordt een verhoogde temperatuur waargenomen, het zogenaamde stadseffect of Urban Heat Island (UHI). De gemiddelde luchttemperatuur in stedelijk gebied kan 7-10°C hoger zijn dan daarbuiten. Een groot aantal oorzaken voor dit verschijnsel is beschreven, zoals meer absorptie van zonlicht door donkere materialen, minder afkoeling (van de lucht) door lagere windsnelheden, minder verdamping, etc (Pieterse-Quirijns e.a., 2011). Het UHI varieert daarnaast per stad, per seizoen en heeft een dagelijks patroon. De verwachting is dat het UHI in de toekomst nog een groter effect gaat hebben.

Er is niet veel bekend over de precieze invloeden op de temperatuurstijging als gevolg van UHI in Nederland, over het dynamisch gedrag van UHI over de dag en per seizoen. Kortom, het UHI kan nog niet gemodelleerd worden. Daarom is voor de uitgangssituatie in dit project gekozen voor het platteland. Dit komt dan overeen met de meest gunstige situatie. Als zich hier een probleem voordoet, kan dit overal verwacht worden door het extra effect van UHI.

keuze afdekking, bodemsoort en diepteligging

De keuze voor de afdekking (bestrating of anders), bodemsoort en diepteligging zijn vastgesteld op basis van praktijkervaring. De meeste distributieleidingen liggen onder de stoep, in een zandbodem/ zandsleuf en op 1 meter diepte. De thermische eigenschappen van de grondsoort bepalen hoe snel de bodem opwarmt. Enigszins vochtig zand warmt het snelst op, en is als worst case scenario daarom gekozen in de uitgangssituatie. Voor de thermische eigenschappen zijn literatuurwaarden en praktijkmetingen gebruikt (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2011).

2.1.2 Beoordelingscriterium bodemmodel

Voor de beoordeling van de verschillende scenario's is een criterium nodig. Uitgaande van de situatie van 2050 W+ wordt een temperatuur van 28,2°C behaald op 1 meter diepte. Eerdere studies laten zien dat de bodemtemperatuur zeer bepalend is voor de temperatuur van het drinkwater aan de tap (Blokker en Pieterse-Quirijns 2010). Scenario's die zorgen dat de bodemtemperatuur onder de 25°C blijft zijn dus beter dan scenario's die daar niet voor zorgen. Daarom is dit het beoordelingscriterium voor scenario's die betrekking hebben op het bodemmodel (Tabel 2-2).

Tabel 2-2 Beoordelingscriterium voor het bodemmodel.

Beoordelingscriterium van het bodemmodel

Scenario waarbij $T_{bodem} < 25^\circ\text{C}$ blijft

2.2 Uitgangssituatie en beoordelingscriterium voor watermodel

2.2.1 Uitgangssituatie watermodel

Het watermodel beschrijft de temperatuurveranderingen van het water in het distributienet. De uitgangssituatie voor het watermodel beschrijft het gebruikte model van een voorzieningsgebied, de temperatuur aan de buitenwand van de leiding, de temperatuur af pompstation, het leidingmateriaal en

het verbruikspatroon op elke aansluiting. In Tabel 2-3 is de uitgangssituatie weergegeven voor het watermodel. Ook hier is gezocht naar een worst case scenario.

Tabel 2-3 Uitgangssituatie voor het watermodel, binnen de scenariostudies voor het onderzoek naar oplossingen voor hoge temperaturen in het distributienet.

Uitgangssituatie van het watermodel	
modelwijk/systeemgebied	Almere
temperatuur aan buitenwand leiding	28°C (2050 W+ scenario)
ingående temperatuur (temperatuur af PS)	15°C
leidingmateriaal	GGIJ, gecementeerd PVC
verbruik	patroon PS

Almere als modelwijk en het bijbehorende verbruik zijn beschreven in paragraaf 2.2.4. De temperatuur aan de buitenwand van de leiding wordt bepaald door de temperatuur van de omringende bodem. Deze bedraagt onder de uitgangssituatie van het bodemmodel iets meer dan 28°C (Tabel 2-1). Als temperatuur af pompstation is gekozen voor de standaardtemperatuur van 15°C. Voor leidingmateriaal is gecementeerd grijs gietijzer gekozen, omdat hierin de watertemperatuur sneller beïnvloed wordt dan in een meer isolerend leidingmateriaal zoals PVC (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2010). Op deze manier wordt de worst case beschouwd. Omdat PVC veel meer wordt toegepast, en omdat de resultaten van scenario's in PVC leidingen anders kunnen zijn dan in gietijzeren leidingen, is een tweede uitgangssituatie gekozen met PVC.

2.2.2 Beoordelingscriterium watermodel

Met EPANET MSX kan op elke aansluiting binnen het systeemgebied/ modelwijk de temperatuur worden berekend. Met behulp van een groeimodel kan ook het aantal micro-organismen (m.o.) worden berekend (§ 2.2.3 en bijlage I). Er zijn drie criteria gedefinieerd, die zowel de bereikte temperatuur als het verband tussen tijdsduur en temperatuur meenemen (Tabel 2-4).

Tabel 2-4 Beoordelingscriterium voor het watermodel op basis van temperatuur en micro-organismen (m.o.).

Beoordelingscriteria van het watermodel	
criterium I	aantal aansluitingen met een bepaalde temperatuur
criterium II	aantal uren dat een verbruiksknoop een $T > 25^{\circ}\text{C}$ heeft
criterium III	relatief aantal m.o. per aansluiting (als N/N_0)

2.2.3 Groeimodel m.o. in watermodel

De nagroei van bacteriën wordt niet alleen beïnvloed door de temperatuur van het drinkwater, maar ook door de tijdsduur dat de bacteriën een bepaalde temperatuur ondervinden. Om dit verband mee te nemen in de scenario's is een model nodig, dat de ontwikkeling beschrijft van m.o. bij verschillende temperaturen.

In het distributienet komen verschillende soorten bacteriën voor die een verschillende afhankelijkheid van temperatuur hebben. Daarnaast hebben omstandigheden zoals de aanwezigheid van biofilm, andere m.o., voldoende voeding, etc. invloed op de groei van bacteriën in het net. Er bestaan geen eenvoudige modellen die deze complexe materie beschrijven. Een uitgebreid dynamisch model voor bacteriegroei in drinkwater distributienetten is beschreven door Dukan e.a. (1996) en Rubulis e.a. (2007).

Doordat het onmogelijk is om alle factoren mee te nemen in een model, wordt in dit project uitgegaan van twee fictieve m.o., waarvan de groei alleen door de temperatuur wordt bepaald. Hierbij wordt impliciet aangenomen dat de overige factoren, zoals biofilm en aanwezigheid van voeding gelijk blijven, onafhankelijk zijn van de temperatuur en geen invloed hebben op de ontwikkeling van de twee fictieve m.o. bij andere temperaturen. Omdat deze aannames niet overeenkomen met de werkelijkheid, kunnen

de modelresultaten slechts geïnterpreteerd worden als relatieve veranderingen. Hiermee kan echter wel een idee worden verkregen van de effectiviteit van koelen, het effect van een temperatuurschok, de invloed van een kleinere verblijftijd, etc.

De verwachting is dat de groeisnelheid toeneemt vanaf een minimale temperatuur en een maximum bereikt bij de optimale temperatuur, waarna de groeisnelheid weer afneemt. De fictieve m.o. verschillen in optimale groeitemperatuur: m.o. I heeft een optimum bij 25°C; m.o. II heeft een optimum bij 37°C. Op basis van beschikbare literatuur (zie bijlage I), is een groeimodel opgesteld dat de ontwikkeling beschrijft van m.o. afhankelijk van de temperatuur. In bijlage I is de ontwikkeling van het groeimodel en de keuze van parameters beschreven.

De groei van de fictieve m.o. als functie van de temperatuur wordt beschreven door:

$$\frac{dN}{dt} = \mu(T) \cdot N \quad \text{met} \quad \mu(T) = \mu_{opt} \cdot e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{0.2 \cdot (T_{min}-T_{opt})^2}}$$

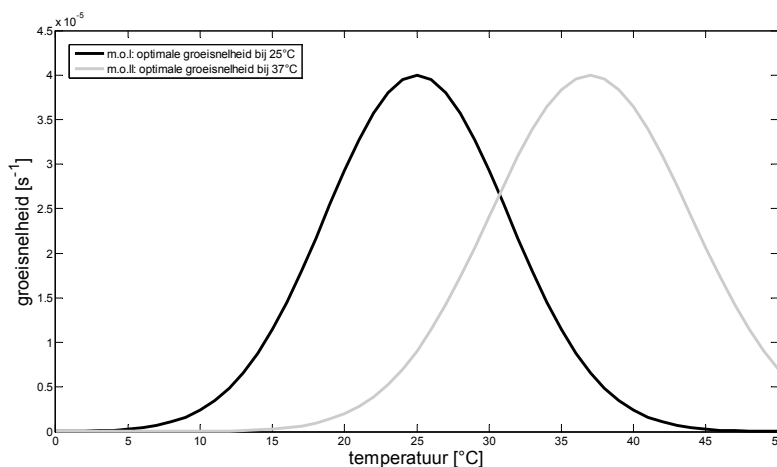
waarin:

- N = aantal micro-organismen [-]
- t = tijd [s]
- $\mu(T)$ = de groeisnelheid bij een bepaalde temperatuur T in [s⁻¹]
- μ_{opt} = de optimale groeisnelheid bij de optimale temperatuur T_{opt} in [s⁻¹]
- T_{min} = de minimale groeitemperatuur [°C]
- T_{opt} = de optimale groeitemperatuur [°C]
- T = de heersende temperatuur [°C]

De parameters in dit groeimodel voor de twee fictieve m.o. zijn weergegeven in Tabel 2-5. De optimale groeisnelheden zijn gekozen op basis van bekende literatuurwaarden voor verdubbelingstijden of optimale groeisnelheden van een specifiek organisme (beschreven in bijlage I). De resulterende groeisnelheden bij verschillende temperaturen is voor beide fictieve m.o. is te zien in Figuur 2-2.

Tabel 2-5 Optimale groeisnelheid, minimale en optimale groeitemperatuur voor twee fictieve m.o.

fictief m.o.	parameters in het groeimodel		
	μ_{opt} [s ⁻¹]	T_{min} [°C]	T_{opt} [°C]
m.o. I	4.10 ⁻⁵	5	25
m.o. II	4.10 ⁻⁵	15	37



Figuur 2-2 De groeisnelheid bij verschillende temperaturen voor twee fictieve m.o.: micro-organisme I met een optimale groeitemperatuur van 25°C en micro-organisme II met een optimale groeitemperatuur van 37°C.

2.2.4 Almere als modelwijk voor het watermodel

In een eerder project is het watermodel reeds toegepast op het leidingnet van Almere (Blokker e.a. 2011). Om praktische redenen is dit model ook in het DPW-project gebruikt. Dit heeft tijd bespaard en Almere lijkt prima model te kunnen staan voor een modern leidingnet van een middelgrote tot grote gemeente.

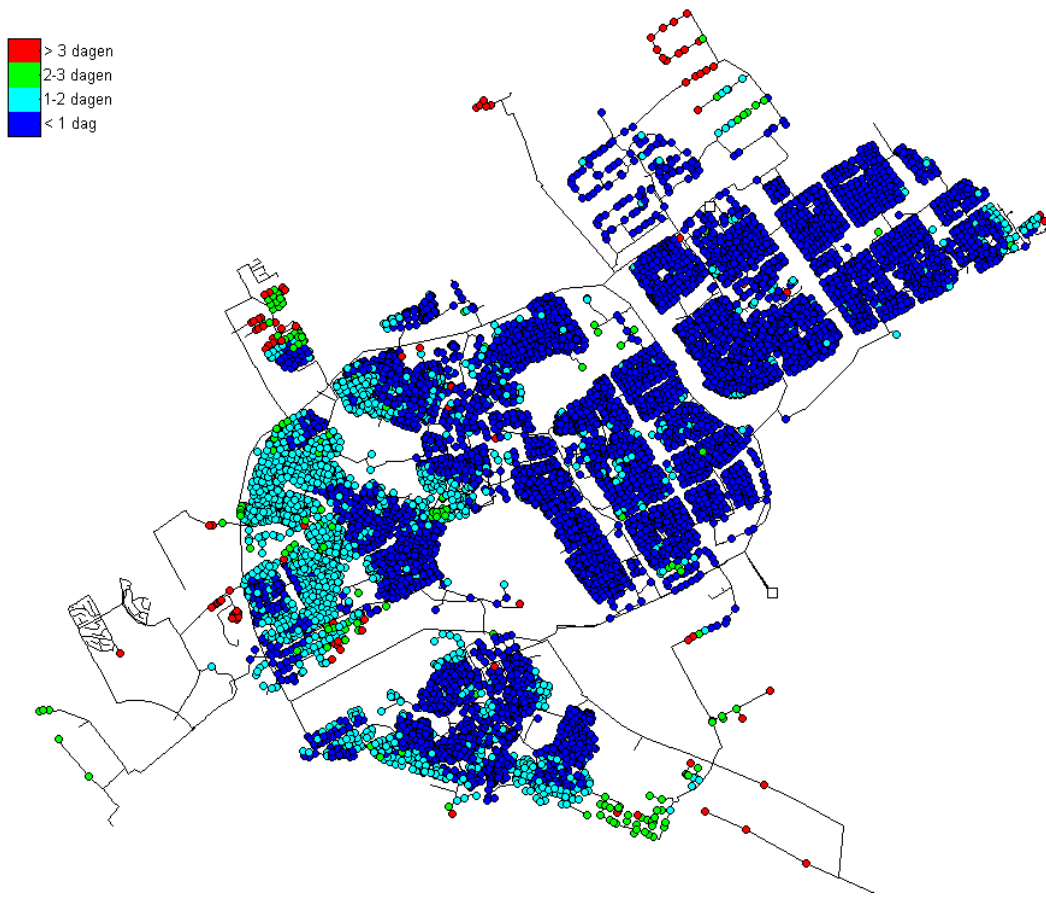
Het leidingnetmodel van Almere is weergegeven in Figuur 2-3. Het leidingnetmodel bestaat uit leidingen (met diameter, materiaal en lengte), knopen (met daarop één of meerdere verbruikers, met hun gemiddelde verbruik), twee pompstations en een verbruikspatroon (van een gemiddelde dag). Het totaal aantal aansluitingen met verbruik is 75.244; dit zijn huishoudens en bedrijven. Alle distributieleidingen zijn in het model opgenomen, de huisaansluitingen (vanaf de straat tot aan de watermeter) zijn er niet in opgenomen. Grofweg bestaat het leidingnet uit 716 km, waarvan 350 km Ø100-150 mm, 130 km Ø150 - 200 mm en 100 km > Ø200 mm.

De pompstations zijn door KWR in het model vereenvoudigd tot een aantal reservoirs met een vaste druk van 300 kPa. Het verbruikspatroon met een tijdstap van 1 uur is door KWR geïnterpoleerd tot een verbruikspatroon met een tijdstap van 1 minuut. De afsluiters zijn uit het model verwijderd.

Een eerste berekening laat zien wat de verblijftijden in het leidingnet zijn na het verlaten van de reinwaterkelders (Figuur 2-4) De verblijftijd is in de meeste knopen minder dan 3 dagen. Bovendien is de tijd die nodig is om water in GGIIJ-leidingen Ø250 mm 10 °C te laten stijgen minder dan 2 dagen (Blokker en Pieterse-Quirijns 2010). Geconcludeerd wordt dat het voldoende is om 3 dagen door te rekenen, dat zijn 2 dagen voor initialisatie en 1 dag voor de echte berekening.



Figuur 2-3. Netwerkmmodel van Almere. Rood omcirkeld zijn reinwaterkelders (Westerterp in het zuiden, en Buitenterp in het noorden). Geel en blauw omcirkeld zijn twee wijken waarop lokaal is ingezoomd, zie § 3.3.



Figuur 2-4. Verblijftijd op alle knopen om 0:00.

3 Scenario's voor het watermodel

3.1 Inleiding

Het watermodel bestaat uit:

- Een EPANET -model met daarin leidingen (met lengte, diameter en wandruwheid), knopen (met verbruik) en reservoirs (pompstations met vaste druk).
- Een MSX-bestand met daarin formules om de temperatuur te berekenen en de groei van m.o. (zie § 2.2.3), constanten en randvoorwaarden (zoals temperatuur af pompstation, de temperatuur van de wand van de leidingen en het aantal m.o. af pompstation).

Voor het doorrekenen van de scenario's moet in sommige gevallen het EPANET -model worden aangepast (de leidingdiameter of verbruik) en in andere het MSX-bestand (andere randvoorwaarden).

3.2 Overzicht van de scenario's

In Tabel 3-1 zijn de verschillende scenario's samengevat voor de uitgangssituatie van een gietijzeren leidingnet; Tabel 3-2 bevat de scenario's voor het PVC leidingnet. De uitgangssituatie (uitgang_scen0 voor GGJ, uitgang_scen7a voor PVC) is het scenario waarmee de effecten van alle maatregelen worden vergeleken. De verschillende parameters die zijn gevarieerd in de verschillende scenario's worden in de volgende paragrafen verder toegelicht. De resultaten van de scenario's uit Tabel 3-1 staan in hoofdstuk 4; de resultaten van de scenario's uit Tabel 3-2 staan in hoofdstuk 5.

Tabel 3-1 Samenvatting scenario's voor het watermodel, uitgangspunt is GGJ leidingnet. Wanneer een cel in de tabel niet ingevuld is gelden dezelfde waarden als voor de uitgangssituatie (scenario 0).

maat-regel	scenario	naam	T_PS (°C)	T_wall (°C)	leiding-materiaal	wand-dikte	diameter	verbruik	opmerkingen
×	uitgangssituatie	0 uitgang_scen0	15	28	GGJ + cement coating ($\lambda=8.9$)	7% $\lambda^* = \lambda_{water} / (15 * \lambda_{pipe})$		PS, gem. dag	
koelen	af pompstation	1 koelen_PS_scen1	10						(§3.4)
		1+ warmer_PS_scen1+	25						(§3.4) temperatuur oppervlaktewater in de zomer
	op voedende leiding, wijk 1	2a koelen_w1_scen2a_3a		26					(§3.5) ca. 100 m ingaande leiding in wijk 1 (dichtbij PS)
		2b koelen_w1_scen2b_3b		18					
	op voedende leiding, wijk 2	3a koelen_w2_scen2a_3a		26					(§3.5) ca. 100 m ingaande leiding in wijk 2 (ver van PS)
		3b koelen_w2_scen2b_3b		18					
	op leiding in de straat, wijk 1	4a koelen_s1_scen4a_5a		26					(§3.5) ca. 100 m vertakte leiding in wijk 1 (dichtbij PS)
		4b koelen_s1_scen4b_5b		18					
	op leiding in de straat, wijk 2	5a koelen_s2_scen4a_5a		26					(§3.5) ca. 100 m vertakte leiding in wijk 2 (ver van PS)
		5b koelen_s2_scen4b_5b		18					
lagere wand-temperatuur	6 ontwerp_bodem_scen6			25				(§3.5) lagere temperatuur in hele leidingnet tgv. ontwerpen in bodemmodel	

maatregel	scenario	naam	T_PS (°C)	T_wall (°C)	leiding-materiaal	wand-dikte	diameter	verbruik	opmerkingen
	isoleren leiding-materiaal	7a	ontwerp_isolatie_scen7a		PVC ($\lambda=0.16$)	3% $\lambda^* = \lambda_{water} / (35 * \lambda_{pipe})$			(§3.6) PVC isoleert
		7b	ontwerp_isolatie_scen7b		PVC ($\lambda=0.16$)	7% $\lambda^* = \lambda_{water} / (15 * \lambda_{pipe})$			(§3.7) grotere wanddikte PVC isoleert
	kleinere diameter	8	ontwerp_diam_scen8_9				<< (zelf-reinigend)		(§3.8) kies kleinere diameters in vertakte leidingnet (wijk 1)
	kleinere diameter	9					<< (zelf-reinigend)		(§3.8) idem (wijk 2)
verblijftijd	dag van maximum verbruik	10	verblijftijd_maxdag_scen10					+10% t.o.v. gem. dag	(§3.9) verhoog verbruik in hele leidingnet
	lokaal extra verbruik (spuien) in wijk 1	11	verblijftijd_lokaal_scen11_12					+30%	(§3.9) verhoog verbruik lokaal (wijk 1) - verversing wijk in 6 uur
	lokaal extra verbruik (spuien) in wijk 2	12						+15%	(§3.9) idem (wijk 2)
	extra verbruik in de nacht	13	verblijftijd_nacht_scen13					pas PS-kromme aan +5%	(§3.9) verhoog verbruik in hele leidingnet gedurende de nacht

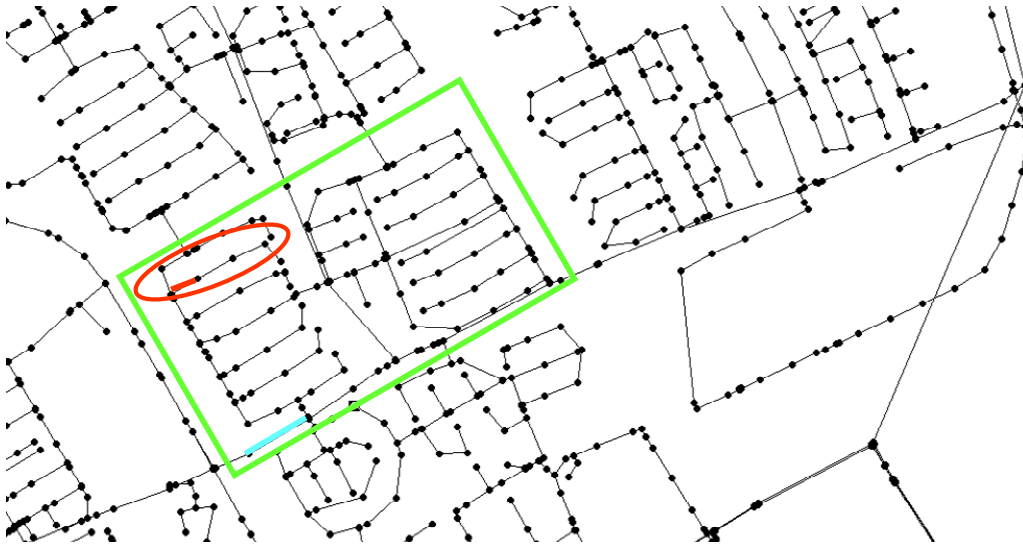
Tabel 3-2 Samenvatting scenario's voor het watermodel, uitgangspunt is PVC leidingnet. Wanneer een cel in de tabel niet ingevuld is gelden dezelfde waarden als voor de uitgangssituatie (scenario 7a).

maatregel	scenario	naam	T_PS (°C)	T_wall (°C)	leiding-materiaal	wand-dikte	diameter	verbruik	opmerkingen
geen	uitgangssituatie	7a	uitgang_scen7a	15	28	PVC ($\lambda=0.16$)	3% $\lambda^* = \lambda_{water} / (35 * \lambda_{pipe})$	PS, gem. dag	
	af pompstation	15	koelen_PS_scen15	10					(§3.4)
		15+	warmer_PS_scen1+	25					(§3.4) temperatuur oppervlaktewater in de zomer
	op voedende leiding, wijk 1	16a	koelen_w1_scen16a_17a		26				(§3.5) ca. 100 m ingaande leiding in wijk 1 (dichtbij PS)
		16b	koelen_w1_scen16b_17b		18				
	op voedende leiding, wijk 2	17a	koelen_w2_scen16a_17a		26				(§3.5) ca. 100 m ingaande leiding in wijk 2 (ver van PS)
		17b	koelen_w2_scen16b_17b		18				
	op leiding in de straat, wijk 1	18a	koelen_s1_scen18a_19a		26				(§3.5) ca. 100 m vertakte leiding in wijk 1 (dichtbij PS)
		18b	koelen_s1_scen18b_19b		18				
		19a	koelen_s2_scen18a_19a		26				

maatregel	scenario	naam	T_PS (°C)	T_wall (°C)	leiding-materiaal	wand-dikte	diameter	verbruik	opmerkingen
ontwerp		19b koelen_s2_scen18b_19b		18					in wijk 2 (ver van PS)
	lagere wand-temperatuur	20 ontwerp_bodem_scen20		25					(§3.5) lagere temperatuur in hele leidingnet tgv. ontwerpen in bodemmodel
	isoleren leiding-materiaal	7b ontwerp_isolatie_scen7b			PVC ($\lambda=0.16$)	7% $\lambda^* = \lambda_{water} / (15 * \lambda_{pipe})$			(§3.7) grotere wanddikte isoleert
	kleinere diameter	21 ontwerp_diam_scen21_22					<< (zelf-reinigend)		(§3.8) kies kleinere diameters in vertakte leidingnet (wijk 1)
kleinere diameter	22					<< (zelf-reinigend)		(§3.8) idem (wijk 2)	
verblijftijd	dag van maximum verbruik	23 verblijftijd_maxdag_scen23						+10% t.o.v. gem. dag	(§3.9) verhoog verbruik in hele leidingnet
	lokaal extra verbruik (spuien) in wijk 1	24 verblijftijd_lokaal_scen24_25						+30%	(§3.9) verhoog verbruik lokaal (wijk 1) - verversing wijk in 6 uur
	lokaal extra verbruik (spuien) in wijk 2	25						+15%	(§3.9) idem (wijk 2)
	extra verbruik in de nacht	26 verblijftijd_nacht_scen26						pas PS-kromme aan +5%	(§3.9) verhoog verbruik in hele leidingnet gedurende de nacht

3.3 Beschrijving locaties bij de scenario's met lokale maatregelen

In Figuur 3-1 en Figuur 3-2 zijn de locaties ingetekend waar lokale maatregelen zijn aangebracht. Het doel van de lokale scenario's is om te onderzoeken of naast het koelen af pompstation ook het lokaal koelen effectief kan zijn. Er zijn daartoe twee wijken geselecteerd: één dichtbij het pompstation, en één verder weg, met een grotere verblijftijd. In elke wijk zijn vergelijkbare leidingen geselecteerd in de wijk of straat waar aanpassingen worden gedaan.



Figuur 3-1. Uitsnede Danswijk. In blauw: leiding (155 m) voor koelen wijk (scenario 2a, 2b, 16a, 16b). In rood: leiding (70 m) voor koelen straat (scenario 4a, 4b, 18a, 18b) en rood omcirkeld de leidingen waarvan de diameter is verkleind (scenario 21). Dit is tevens het gebied waarop de lokale maatregelen op straatniveau worden geëvalueerd. Groen omkaderd: de wijk waarin verbruik wordt verhoogd (scenario 11, 24). Dit is tevens het gebied waarop de lokale maatregelen op wijkniveau worden geëvalueerd.



Figuur 3-2. Uitsnede Muziekwijk. In blauw: leiding (145 m) voor koelen wijk (scenario 3a, 3b, 17a, 17b). In rood: leiding (55 m) voor koelen straat (scenario 5a, 5b, 19a, 19b) en rood omcirkeld de leidingen waarvan de diameter is verkleind (scenario 9, 22). Dit is tevens het gebied waarop de lokale maatregelen op straatniveau worden geëvalueerd. Groen omkaderd: de wijk waarin verbruik wordt verhoogd (scenario 12, 25). Dit is tevens het gebied waarop de lokale maatregelen op wijkniveau worden geëvalueerd.

3.4 Temperatuur af pompstation

In de uitgangssituatie (scenario 0, 7a) is de temperatuur af pompstation 15 °C. In een alternatieve situatie (scenario 1+, 15+) is de temperatuur af pompstation 25 °C. Dit is een denkbare situatie in de zomer

wanneer oppervlaktewater als bron voor de drinkwaterbereiding wordt gebruikt. Dit scenario maakt duidelijk hoeveel invloed de temperatuur af pompstation heeft, maar het is geen maatregel. In het geval van oppervlaktewater kan scenario 0 als maatregel ten opzichte van scenario 1+ worden gezien. Door vergelijking van dit scenario met de uitgangssituatie, wordt een indicatie gekregen van de effectiviteit van koelen af PS op de uiteindelijke nagroei. Immers, de temperatuur zal uiteindelijk overal hetzelfde zijn, maar het water heeft door het koelen minder lang een hoge temperatuur, en zal dus een effectieve maatregel kunnen zijn bij oppervlaktewater. In scenario's 1 en 15 is de temperatuur af pompstation 10 °C; dit zijn scenario's voor koelen.

3.5 Temperatuur van de wand

Er zijn verschillende scenario's waarin de wandtemperatuur in het model wordt veranderd. Hoe in werkelijkheid deze temperatuurverlaging kan worden bereikt wordt in hoofdstuk 6 beschreven. In scenario 6 wordt de wandtemperatuur in het gehele leidingnet van 28 naar 25 °C gebracht. In de scenario's 4 en 5 (18 en 19) wordt alleen lokaal gekoeld met een verschiltemperatuur van 2 en 10 °C (naar 26 en 18 °C).

3.6 Leidingmateriaal

In het MSX-bestand worden de thermische eigenschappen van het leidingmateriaal opgegeven. Er zijn geen aanpassingen aan wandruwheid nodig. Voor (gecementeerd) gietijzer wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt berekend door de dikte van de wand en het cementlaagje en de warmtegeleiding van gietijzer en cement in de volgende formule in te vullen:

$$\lambda_{w,tot} = \frac{d_{w,tot}}{\frac{d_{w,1}}{\lambda_{w,1}} + \frac{d_{w,2}}{\lambda_{w,2}}} = \frac{0,012}{\frac{0,01}{60} + \frac{0,002}{1,7}} = 8,9 \text{ W/m.K}$$

Voor PVC is de warmtegeleidingscoëfficiënt gelijk aan 0,16 W/m.K. Dit is in scenario 7a en 7b voor het gehele leidingnet opgegeven. Daarmee zijn de extremen in warmtegeleidingscoëfficiënt van materialen die gebruikt worden in het distributienet afgedekt (Tabel 3-3).

Tabel 3-3. Warmtegeleidingscoëfficiënt voor verschillende leidingmaterialen.

leidingmateriaal	λ (W/m.K)	Bron
PVC	0,16	Rafferty (1998)
PE	0,39	Rafferty (1998)
SLA	0,39	Gelijk aan HDPE, Al doet niks qua isolatie
GVK	0,4	Rafferty (1998)
AC	0,43	Rafferty (1998)
cement / beton	1,7	Wikipedia
gecementeerd GGJ	8,9	zie berekening hierboven
NGGIJ (zonder lining)	34,6	Rafferty (1998)
Aluminiumlegering	120 - 180	Wikipedia

3.7 Wanddikte

In het MSX-bestand worden de thermische eigenschappen van de leiding berekend, o.a. op basis van de dikte van de leidingwand. De dikte van de leidingwand wordt voor het gemak als een vast percentage van de diameter opgegeven. Voor gietijzer is 7% aangehouden. Voor PVC is 3% aangehouden (scenario 7a) en voor extra isolerend PVC is 7% aangehouden (scenario 7b). De percentages zijn gekozen op basis van de gegevens in Tabel 3-4 en Tabel 3-5 en de meest voorkomende diameters in het leidingnetmodel. PVC met een drukklasse van PN6 heeft een wanddikte van ongeveer 3%; PVC met een drukklasse van PN12,5 - PN 16 heeft een wanddikte van ongeveer 7% (BRL-K17301).

Afhankelijk van de gebruikte wanddikte wordt λ^* aangepast:

- 3%: $\lambda^* = \lambda_{\text{water}} / (35 * \lambda_{\text{pipe_wall}})$
- 7%: $\lambda^* = \lambda_{\text{water}} / (15 * \lambda_{\text{pipe_wall}})$

Tabel 3-4. Typische diameters en wanddikten van gietijzer leidingen (<http://www.gizmology.net/pipe.htm>).

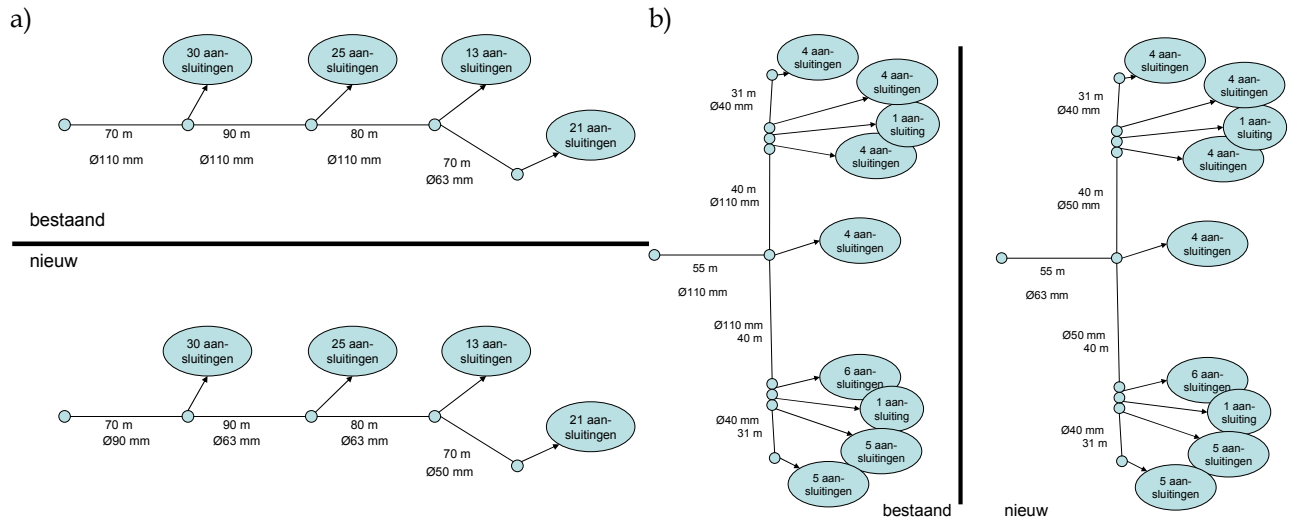
N mm	N "	klasse A			klasse B			klasse C			klasse D		
		D "	d "	d %	D "	d "	d %	D "	d "	d %	D "	d "	d %
75	3	3,8	0,39	10,3%	3,96	0,42	10,6%	3,96	0,45	11,4%	3,96	0,48	12,1%
100	4	4,8	0,42	8,8%	5	0,45	9,0%	5	0,48	9,6%	5	0,52	10,4%
150	6	6,9	0,44	6,4%	7,1	0,48	6,8%	7,1	0,51	7,2%	7,1	0,55	7,7%
200	8	9,05	0,46	5,1%	9,05	0,51	5,6%	9,3	0,56	6,0%	9,3	0,6	6,5%
250	10	11,1	0,5	4,5%	11,1	0,57	5,1%	11,4	0,62	5,4%	11,4	0,68	6,0%
300	12	13,2	0,54	4,1%	13,2	0,62	4,7%	13,5	0,68	5,0%	13,5	0,75	5,6%
350	14	15,3	0,57	3,7%	15,3	0,66	4,3%	15,65	0,74	4,7%	15,65	0,82	5,2%
400	16	17,4	0,6	3,4%	17,4	0,7	4,0%	17,8	0,8	4,5%	17,8	0,89	5,0%
450	18	19,5	0,64	3,3%	19,5	0,75	3,8%	19,92	0,87	4,4%	19,92	0,96	4,8%
500	20	21,6	0,67	3,1%	21,6	0,8	3,7%	22,06	0,92	4,2%	22,06	1,03	4,7%

Tabel 3-5. Typische diameters en wanddikten van PVC-leidingen (BRL-K17301); PN10 voor kleine diameters, PN6 voor grotere diameters.

diameter (mm)	binnendiameter (mm)	d (mm)	d (%)
40	36,2	1,9	5,2%
50	46	2	4,3%
63	59	2	3,4%
75	70,6	2,2	3,1%
90	85,6	2,2	2,6%
110	104,6	2,7	2,6%
160	152	4	2,6%
200	190,2	4,9	2,6%
250	237,6	6,2	2,6%
315	299,6	7,7	2,6%

3.8 Leidingdiameter

De leidingdiameter wordt verkleind zodat de stroomsnelheid toeneemt en de verblijftijd afneemt. Naar verwachting is het effect op de temperatuur nihil (Blokker en Pieterse, 2010), maar op de nagroei kan er wel een invloed zijn. De leidingdiameter moet worden aangepast in het EPANET -bestand. Er is voor gekozen om slechts een klein deel van de leidingen aan te passen. Het leidingnet van Almere is grotendeels ontworpen als vertakt leidingnet, maar niet met de kleine diameters die tot een zelfreinigend leidingnet leiden. In de Danswijk en Muziekwijk zijn twee stukken van het leidingnet (zie ook Figuur 3-1 en Figuur 3-2) opnieuw ontworpen volgens de ontwerpregels voor zelfreinigende leidingnetten. Dit leidt tot kleinere diameters. De invloed op de temperatuur en groei van m.o. is dus alleen lokaal vast te stellen. Figuur 3-3 laat het bestaande en aangepaste ontwerp, met kleinere diameters, zien.

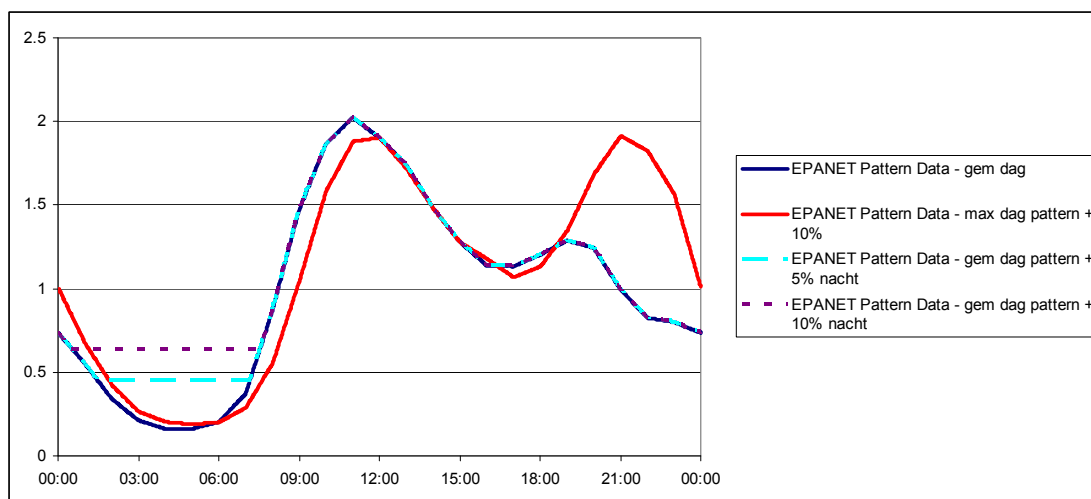


Figuur 3-3. Bestaande en aangepaste diameters van a) leiding in de Danswijk (wijk 1) en b) leiding in de Muziekwijk (wijk 2).

3.9 Verblijftijd beïnvloeden door verbruik aan te passen

Door het verbruik te verhogen zal de verblijftijd afnemen. Het water krijgt minder lang de tijd om op te warmen en de nagroei wordt beïnvloed door de (tijdelijk) lagere temperatuur en de kortere tijd die beschikbaar is voor nagroei. Het verbruik per knoop moet worden aangepast in het EPANET -bestand. In het EPANET -bestand zit een verbruikspatroon van *multipliers* met een gemiddelde van 1 (blauwe lijn in Figuur 3-4). Op iedere knoop wordt een *base demand* (basisverbruik) opgegeven en een verwijzing naar het verbruikspatroon. In de scenario's waarin het verbruik wordt verhoogd, wordt dit telkens iets anders gedaan:

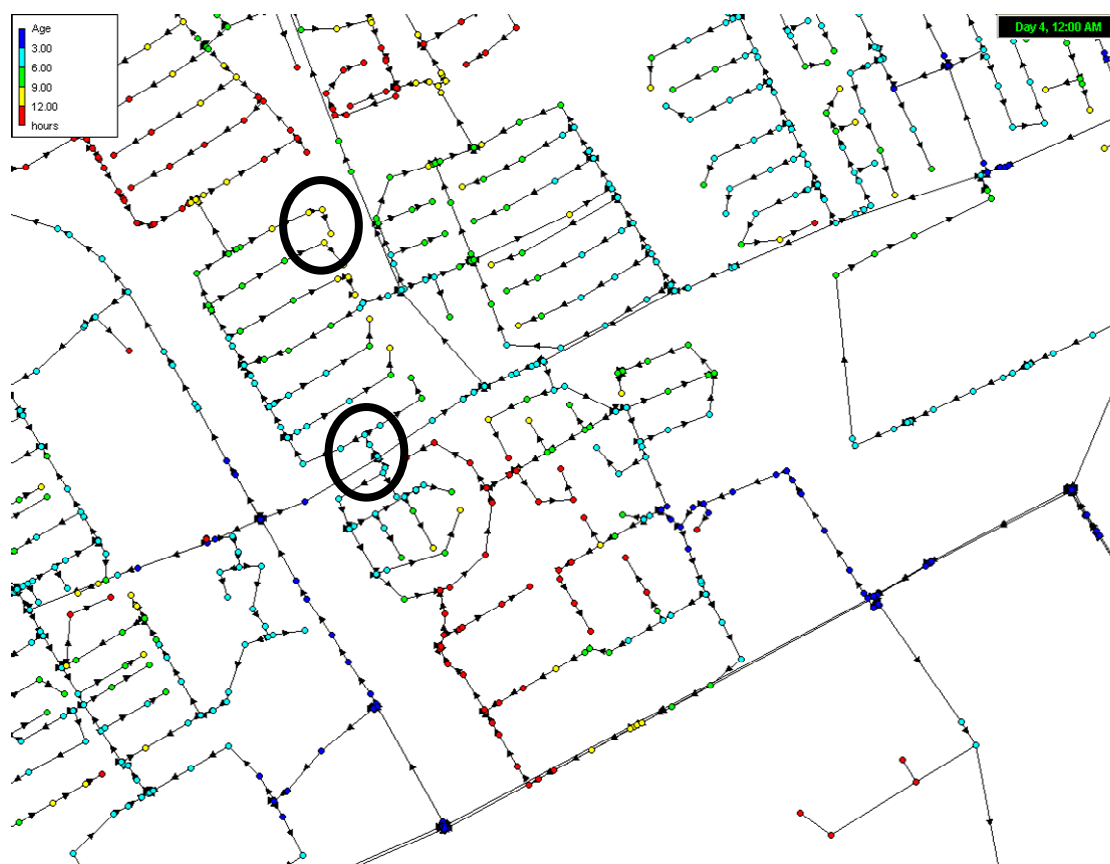
- Scenario 10 (en 23 voor PVC): de dag van maximaal verbruik wordt gesimuleerd. In deze situatie is het verbruik verhoogd en volgt een ander patroon over de dag. Daartoe is een ander verbruikspatroon toegepast (rode lijn in Figuur 3-4) met een gemiddelde van 1,1 (10% extra verbruik). Alleen het verbruikspatroon is aangepast, de *base demands* zijn gelijk gebleven.
- Scenario 11 en 12 (en 24, 25 voor PVC): lokaal in de Danswijk en Muziekwijk is extra verbruik toegekend. Het verbruikspatroon is gelijk gebleven, de *base demands* zijn met 30% respectievelijk 15% verhoogd. Deze verhoging van het verbruik zorgt voor een maximale verblijftijd van 6 uur in deze wijken (zie § 3.9.1 en 3.9.2). Door het lokaal verhogen van het verbruik wordt de verblijftijd op de meeste knopen verkort, maar op sommige knopen kan de verblijftijd iets langer worden door de vermaasde structuur van het net.
- Scenario 13 (en 26 voor PVC): alleen 's nachts is er extra verbruik. Daartoe is 5% extra verbruik toegevoegd in de nachtelijke uren (lichtblauwe gestippelde lijn in Figuur 3-4; de 10% extra verbruik uit deze figuur is niet toegepast) met een gemiddelde van 1,05. Alleen het verbruikspatroon is aangepast, de *base demands* zijn gelijk gebleven.



Figuur 3-4. Verbruikskrommen.

3.9.1 Verbruik in de Danswijk (wijk 1)

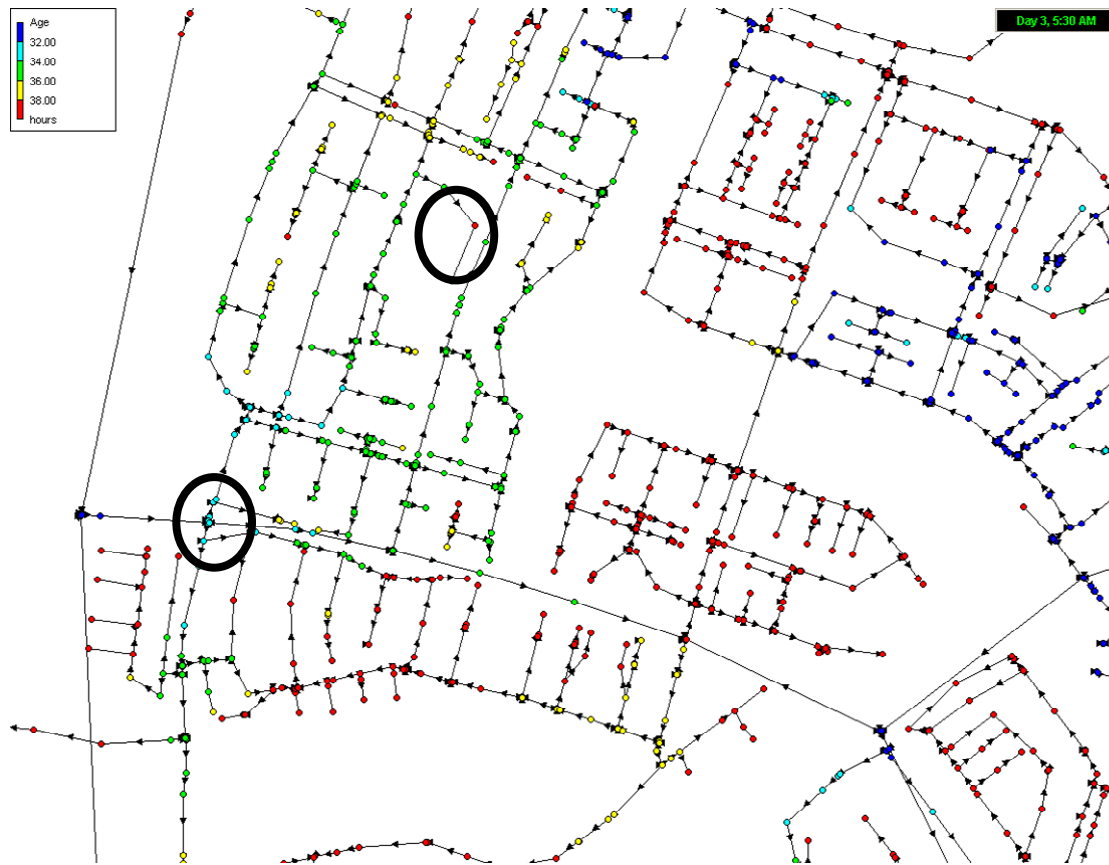
De verblijftijd van het begin van de Danswijk tot aan de laatste verbruiksknoop is bij gemiddeld verbruik maximaal 9 uur (verblijftijd vanaf het pompstation tot aan het begin van de wijk 3 uur, en vanaf het pompstation tot aan het einde van de wijk 12 uur). Door het toekennen van extra verbruik wordt de verblijftijd korter. Een verbruik van +30% extra leidt tot een verblijftijd van maximaal 6 uur in de Danswijk.



Figuur 3-5. Verblijftijden in de Danswijk.

3.9.2 Verbruik in de Muziekwijk (wijk 2)

De verblijftijd van het begin van de Muziekwijk tot aan de laatste verbruiksknoop is bij gemiddeld verbruik maximaal 7 uur (verblijftijd vanaf het pompstation tot aan het begin van de wijk 32 uur, en vanaf het pompstation tot aan het einde van de wijk 39 uur). Een verbruik van +15% extra leidt tot een verblijftijd van maximaal 6 uur in de Muziekwijk.



Figuur 3-6. Verblijftijden in de Muziekwijk.

4 Resultaten scenario's watermodel (GGIJ)

4.1 Scenario 0: uitgangssituatie met GGIJ

In netwerkplaatjes worden op de knopen met verbruik (11287 knopen in totaal) de waarden van de verschillende criteria getoond. Ook in de rest van dit hoofdstuk worden de analyses alleen gedaan op knopen waarop verbruik zit.

In de uitgangssituatie voor een GGIJ netwerk, is de temperatuur (Figuur 4-1) in vrijwel het gehele net gelijk aan de bodemtemperatuur van 28 °C en dit is ook vrijwel gedurende de gehele dag het geval (Figuur 4-2). Alleen dicht op de pompstations is de temperatuur nog lager. Voor de groei van de m.o. (Figuur 4-3, Figuur 4-4) is daarom vooral de verblijftijd van belang (Figuur 2-4); de temperatuur over het gehele traject is namelijk vrijwel constant.

Omdat in GGIJ netwerk, de temperatuur in vrijwel het gehele net gelijk is aan de bodemtemperatuur (de bodemtemperatuur wordt namelijk heel snel bereikt), zal de temperatuur af pompstation zeer beperkt van invloed zijn. Daarom is scenario 1+ (met een hogere temperatuur af PS, maar verder dezelfde uitgangspunten) niet verder uitgewerkt.



Figuur 4-1. Temperatuur op alle knopen om 0:00 (°C).



Figuur 4-2. Aantal uren per dag dat de temperatuur boven 25 °C is op alle knopen.



Figuur 4-3. Aantal m.o. type I (N/N_0) op alle knopen om 0:00.



Figuur 4-4. Aantal m.o. type II (N/N_0) op alle knopen om 0:00.

4.2 Maatregelen op het gehele leidingnet

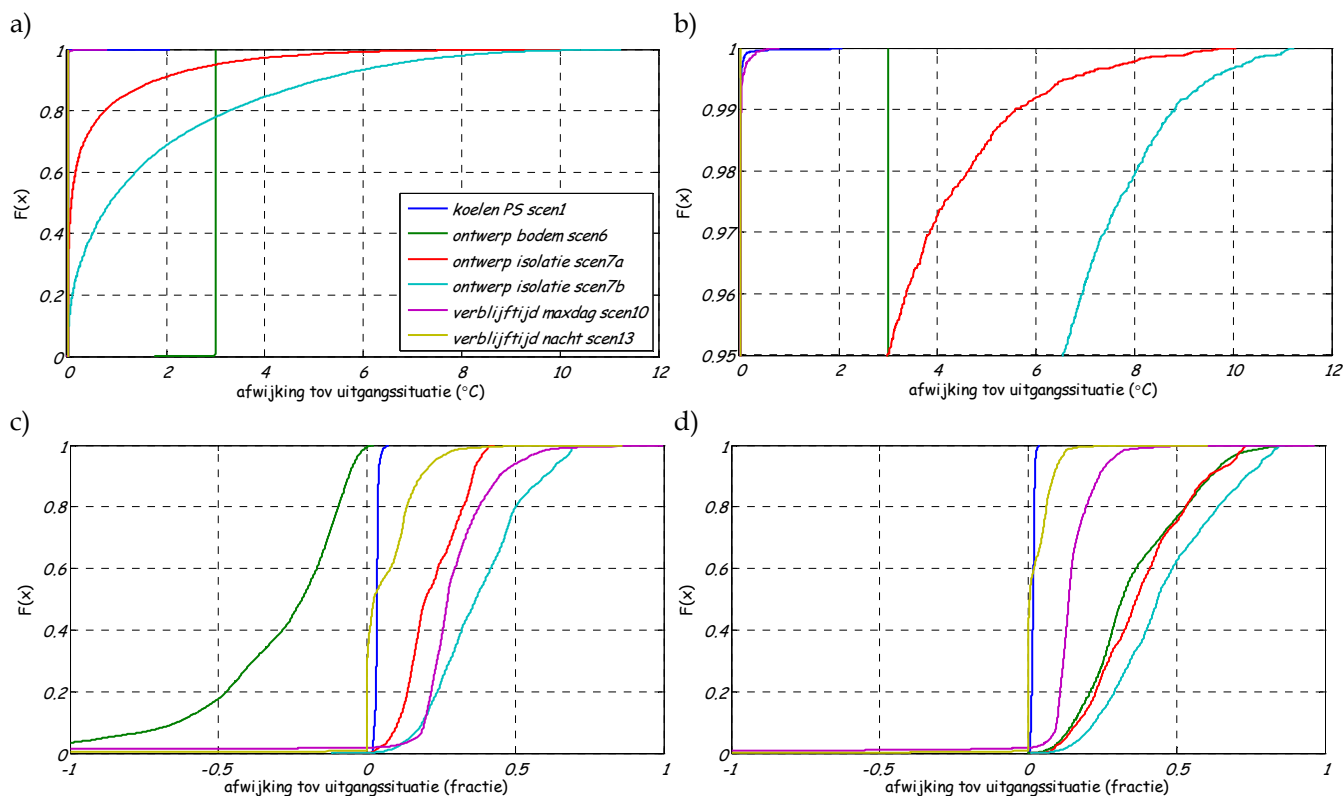
Figuur 4-5a en b laat het temperatuurverschil zien tussen de Ausgangssituatie en de specifieke maatregel. Een waarde van 2 op de x-as betekent dat in het maatregelscenario een 2 °C lagere temperatuur wordt gevonden dan in de Ausgangssituatie. De waarde op de y-as geeft aan hoeveel aansluitingen dit temperatuurverschil heeft. Bijvoorbeeld: bij isolatie volgens scenario 7b, blijkt dat 70% van de aansluitingen (y-as) een temperatuurverschil heeft lager dan 2 °C (x-as) met de Ausgangssituatie.

De figuur laat zien dat de temperatuur het sterkst wordt beïnvloed door het kiezen van een ander leidingmateriaal. In een gietijzeren leidingnet bereikt het drinkwater de klanten vrijwel altijd met de bodemtemperatuur. Het koelen af pompstation en het verkorten van de verblijftijd heeft dan vrijwel geen invloed. Het verlagen van de bodemtemperatuur met 3 graden (25 °C in plaats van 28 °C) leidt ook tot 3 graden lagere temperatuur aan de tap. Het toepassen van een isolerend leidingmateriaal heeft een grote invloed. Bij 50% van de aansluitingen wordt een temperatuurwinst van minimaal 1 °C gehaald in scenario 7b.

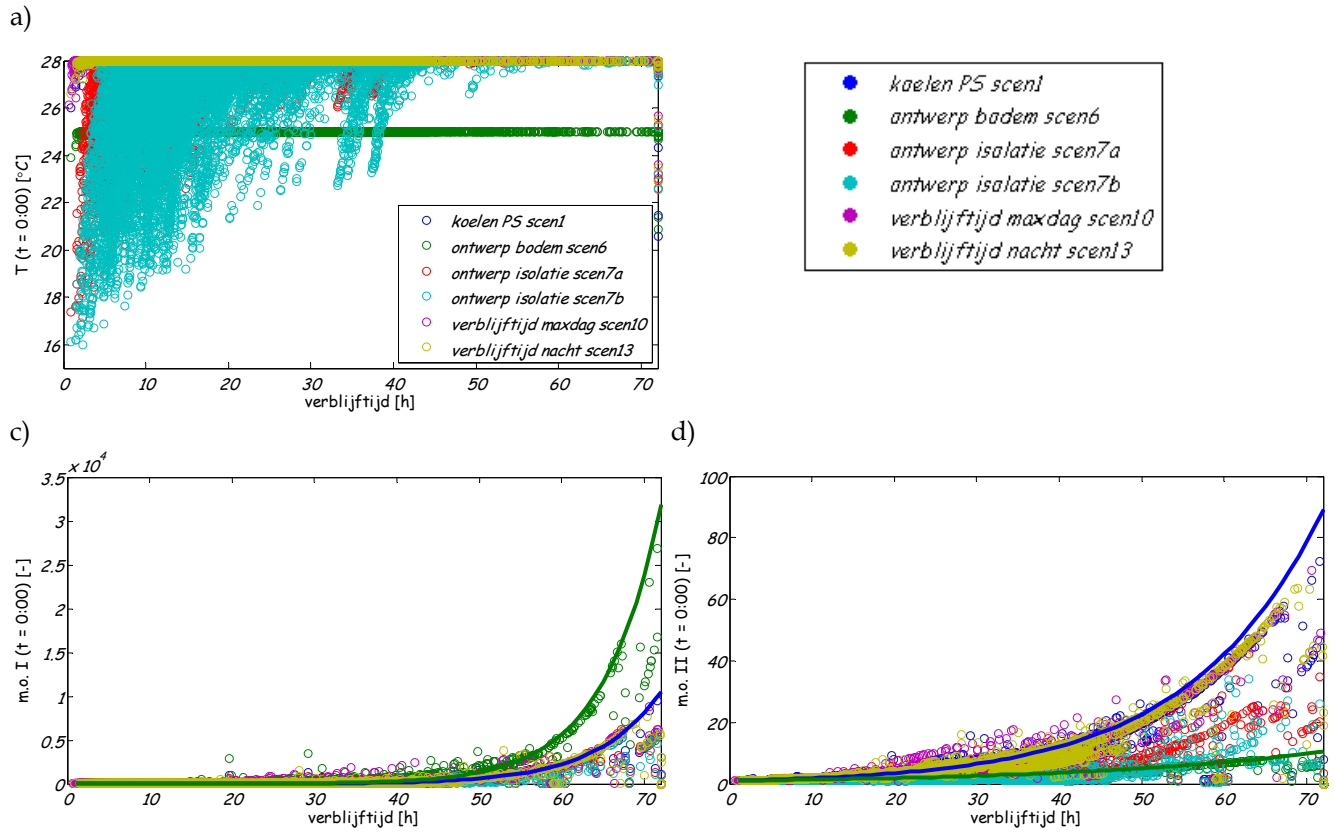
Figuur 4-5c en d laat de groei van de twee fictieve m.o. zien. Een waarde van 1 op de x-as betekent dat 100% minder m.o. gevonden worden in het geval van een specifieke maatregel opzichte van de Ausgangssituatie; een waarde van 0 betekent geen verschil en een negatieve waarde betekent dat in het maatregelscenario meer m.o. groeien. De waarde op de y-as geeft weer aan hoeveel aansluitingen deze fractie van de oorspronkelijke m.o. heeft.

De figuren laten zien dat de groei van de m.o. sterk wordt beïnvloed door isolatie, maar ook door de verblijftijd (minder tijd om te groeien) en de bodemtemperatuur. De verblijftijd verkorten met 10% extra verbruik over de gehele dag (max dag scenario) heeft een grotere invloed dan de verblijftijd verkorten door 5% extra verbruik in de nacht (scenario verblijftijd nacht). Omdat m.o. type I (Figuur 4-5c) een optimale groeisnelheid heeft bij 25 °C geeft scenario 6 hier een verslechtering te zien, het aantal m.o. is immers toegenomen; voor m.o. type II is er wel een vermindering in groei bij dit scenario. Koelen af pompstation draagt nauwelijks bij aan het beperken van de groei van m.o. bij een GGIJ net.

Figuur 4-6 laat de relatie zien tussen de verblijftijd en de verschillende criteria. De verblijftijd is nauwelijks van invloed op de temperatuur in de scenario's met gietijzeren leidingen. Voor een leidingnet van PVC is dit anders (zie § 5.2). Koelen af pompstation heeft alleen een effect op de temperatuur vlak bij het pompstation (< 6 uur verblijftijd). De verblijftijd is van grote invloed op de groei van de m.o. Voor de scenario's met gietijzer waarbij de watertemperatuur vrijwel constant is volgt de groeicurve de voorspelde curve bij constante temperatuur (de doorgetrokken lijnen in Figuur 4-6c en d). Voor de scenario's met PVC waarbij de watertemperatuur langzaam toeneemt, is er een afwijking van de groei ten opzichte van de voorspelde groei (Figuur 5-6).



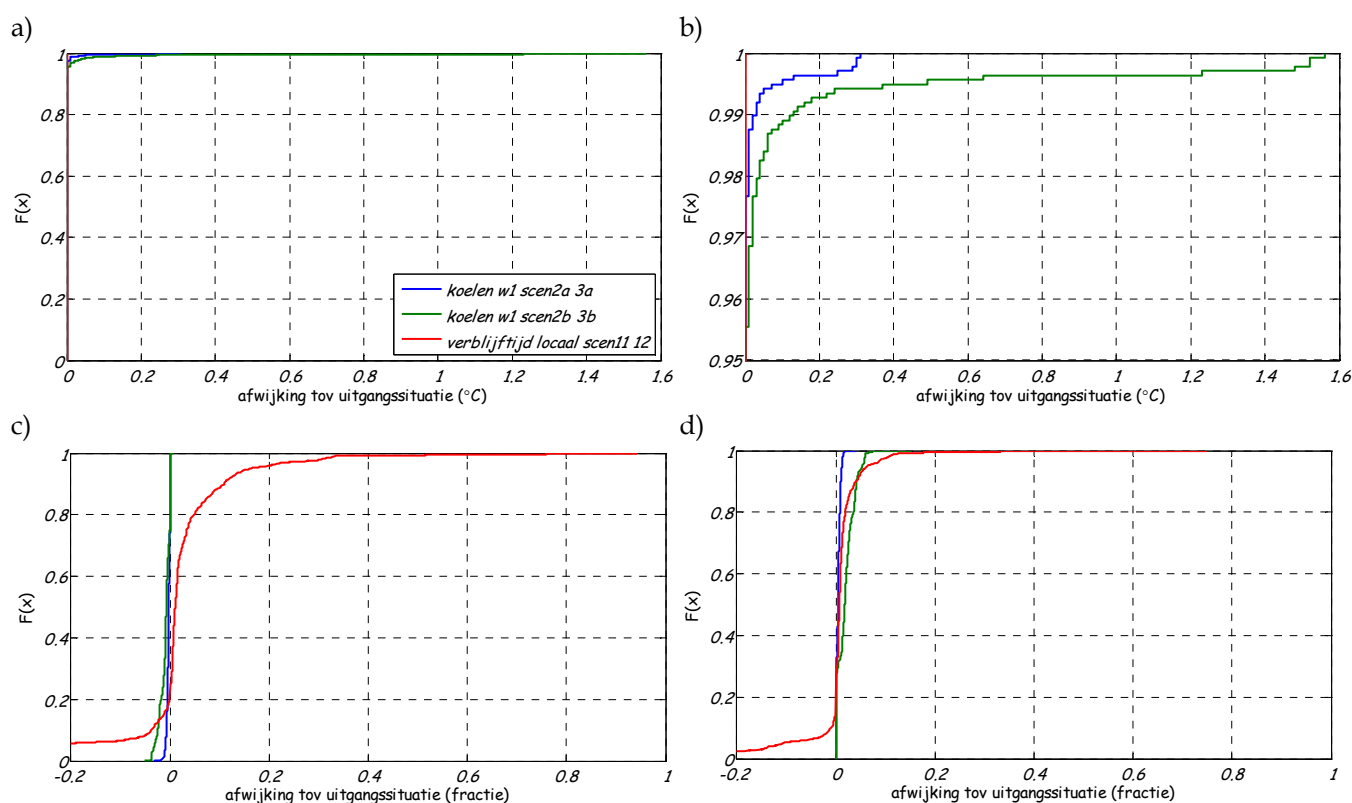
Figuur 4-5. Vergelijking van scenario's met Ausgangssituatie (scenario 0) op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur b) idem, maar ingezoomd op de y-as; c) verschil (fractie) van aantal m.o. type I in scenario 0 en de globale scenario's en d) verschil (fractie) van aantal m.o. type II in scenario 0 en de globale scenario's.



Figuur 4-6. Relatie tussen verblijftijd en de verschillende criteria voor de verschillende globale scenario's op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur; c) aantal m.o. type I en d) aantal m.o. type II. De doorgetrokken lijnen geven de voorspelling aan van de groei bij 28 °C (blauwe lijn) en 25 °C (groene lijn).

4.3 Maatregelen op wijkniveau

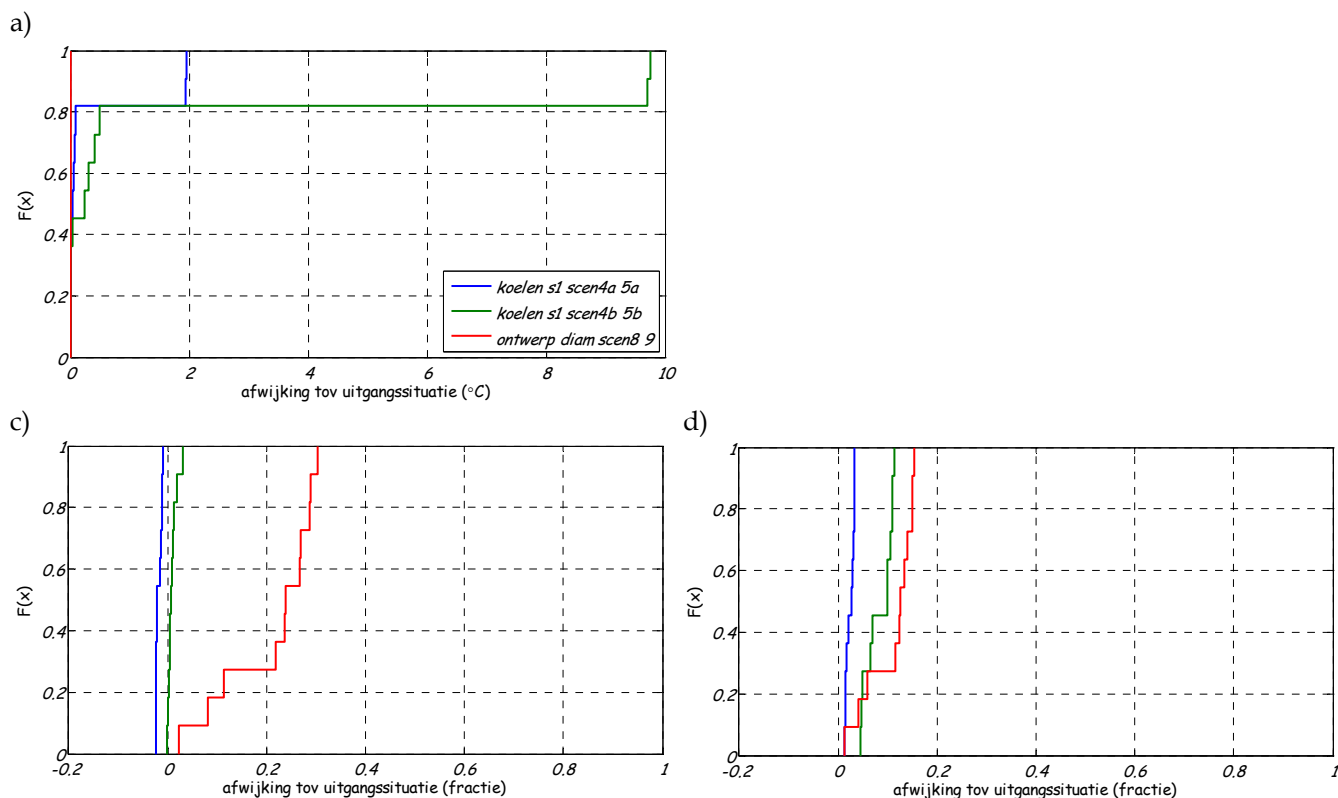
De maatregelen op wijkniveau beïnvloeden de temperatuur zeer beperkt (koelen met een ΔT van 2 of 10 °C) of niet (verblijftijd verkort door lokaal verhoogd verbruik), zie Figuur 4-7b. Het verkorten van de verblijftijd heeft wel een positief effect op de groei van de m.o. (Figuur 4-7c en d), maar dit is wel minder dan bij de globale maatregelen uit de vorige paragraaf. D.w.z. op maar een beperkt aantal knopen is een verbetering merkbaar. Dit komt doordat de verblijftijd in de wijk wel korter wordt, maar de verblijftijd tot aan de wijk blijft vrijwel even lang. Omdat gerekend is met verbruikskrommen volgens gemeten PS-verbruik en niet met meer gedetailleerde verbruikspatronen (bijvoorbeeld op basis van SIMDEUM) wordt geen goed beeld verkregen van de lange verblijftijden tot aan de uiteinden van het leidingnet en het effect van het stimuleren van extra verbruik.



Figuur 4-7. Vergelijking van scenario's met uitgangssituatie (scenario 0) op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur b) idem, maar ingezoomd op de y-as; c) verschil (fractie) van aantal m.o. type I in scenario 0 en de lokale scenario's en d) verschil (fractie) van aantal m.o. type II in scenario 0 en de lokale scenario's. Analyse op 336 verbruiksknopen (2494 adressen).

4.4 Maatregelen op straatniveau

De maatregelen op straatniveau beïnvloeden de temperatuur (Figuur 4-8a) op de direct achterliggende knopen wel duidelijk (koelen met ΔT van 2 of 10 °C); het verkorten van de verblijftijd door kleinere diameters heeft geen effect op de temperatuur omdat de bodemtemperatuur van 28 °C al bereikt is voor de specifieke locatie. Het verkorten van de verblijftijd door het verkleinen van de diameter heeft een veel groter effect op de groei van de m.o. dan het lokaal koelen (Figuur 4-8c en d).



Figuur 4-8. Vergelijking van scenario's met uitgangssituatie (scenario 0) op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur; c) verschil (fractie) van aantal m.o. type I in scenario 0 en de lokale scenario's en d) verschil (fractie) van aantal m.o. type II in scenario 0 en de lokale scenario's. Analyse op 11 verbruiksknopen (49 adressen).

4.5 Vergelijken van alle maatregelen op lokaal niveau

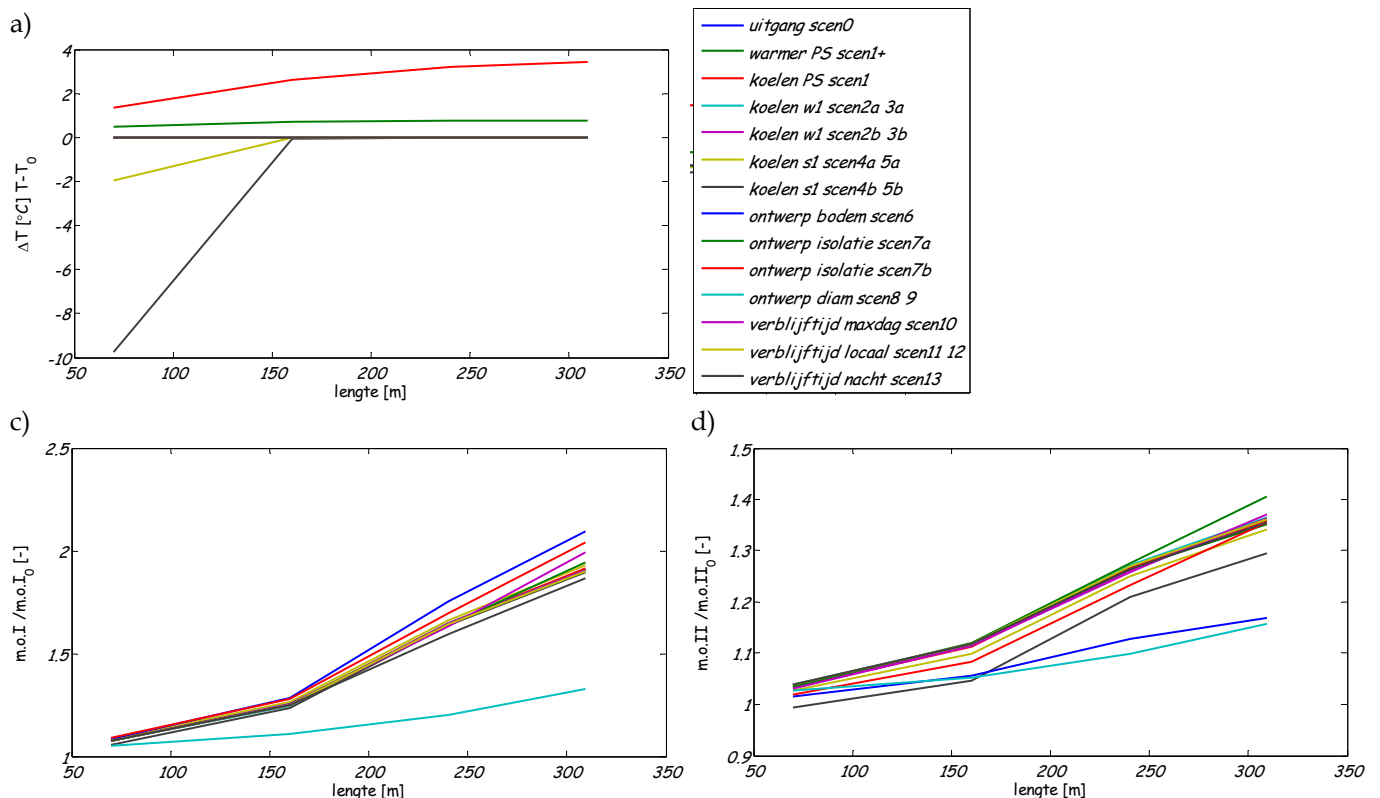
Om de effecten van de verschillende maatregelen op lokaal niveau te beoordelen en te kunnen inschatten wat het effect is wanneer lokale maatregelen breed worden ingezet, zijn in Figuur 4-9 en Figuur 4-10 de lokale effecten van de maatregelen getoond. Uitgezet is de temperatuurverhoging op de knopen na knoop '0' (de knoop aan het begin van de straat, de 1^e knoop voor de gekoelde leiding, 1^e knoop voor kleinere diameter etc.), dus op de knopen in de straten waarop is ingezoomd in de Danswijk en de Muziekwijk. Voor de groei van de m.o. is gekeken naar de groei ten opzichte van de hoeveelheid op de knoop aan het begin van de straat (aantal m.o. op de knopen gedeeld door het aantal m.o. op knoop '0'). Er wordt dus alleen gekeken naar wat er in de laatste streng gebeurt, wat er tussen pompstation en knoop '0' is gebeurd wordt buiten beschouwing gelaten.

Het scenario waarin lokaal gekoeld wordt (scenario 4 en 5) heeft een groot effect op de eerste knoop na de leiding, maar daarna is het effect al zeer beperkt. In het scenario met PVC (scenario 7a en 7b) neemt de temperatuur nog toe na knoop '0', omdat de eindtemperatuur (28 °C) nog niet bereikt was. Alle andere scenario's hebben geen effect op de temperatuur. Het verkleinen van de diameter (scenario 8, 9) heeft het grootste effect op de groei van de m.o.

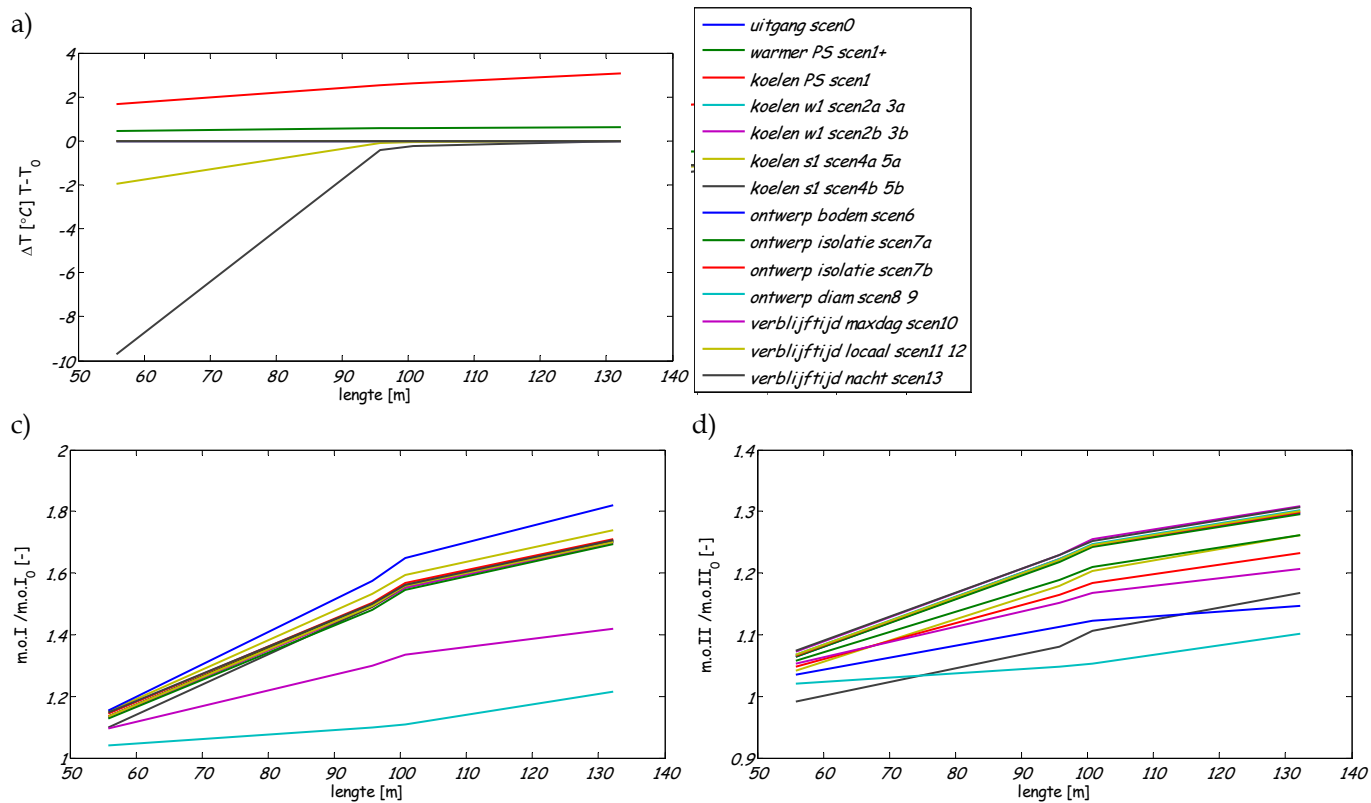
In de Danswijk (dichtbij het pompstation, Figuur 4-9) heeft het verlagen van de bodemtemperatuur (scenario 6) heel duidelijk een negatief effect op het beperken van de groei van m.o. I; ook heeft dikwandige PVC (scenario 7b) een vergelijkbaar effect. Dit komt doordat de optimale groei bij een lagere temperatuur dan 28 °C plaats heeft en in de Danswijk onder deze omstandigheden de temperatuur van 28 °C nog niet bereikt is. Voor de groei van m.o. II blijkt dat de verlaagde bodemtemperatuur (scenario 6) en 10 graden koelen in de straat (scenario 4b) een positieve invloed hebben op de laatste meters in het leidingnet.

In de Muziekwijk (ver van het pompstation, Figuur 4-10) heeft het verlagen van de bodemtemperatuur (scenario 6) heel duidelijk een effect op het beperken van de groei van m.o. I (in de Danswijk is dit in beperkte mate zichtbaar); ook heeft het koelen in de straat van 2 graden (scenario 5b) een vergelijkbaar effect. Dit komt doordat de optimale groei bij een lagere temperatuur dan 28 °C plaats heeft. Een positief effect heeft het verkorten van de verblijftijd door 10% verhoogd verbruik op de max dag (scenario 10), veel meer dan verhoogd verbruik in de nacht of lokaal verhoogd verbruik van 15% (scenario's 13 en 12). Voor de groei van m.o. II is meer gradatie zichtbaar in de effecten van de verschillende maatregelen. Scenario's met verkleinen diameter (9), koelen met een ΔT van 10 °C (5b) en koelen van de bodem met een ΔT van 3 °C (6) hebben de meeste invloed.

Het verkleinen van de diameter heeft dus geen invloed op de temperatuur maar door het verkorten van de verblijftijd wel een zeer belangrijke bijdrage aan het beperken van de groei van de m.o.



Figuur 4-9. Vergelijking van scenario's met criterium op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat in de Danswijk; a) verschil in temperatuur; c) ratio van aantal m.o. type I en d) ratio van aantal m.o. type II. Analyse op 4 verbruiksknopen.



Figuur 4-10. Vergelijking van scenario's met criterium op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat in de Muziekwijk; a) verschil in temperatuur; c) ratio van aantal m.o. type I en d) ratio van aantal m.o. type II. Analyse op 4 verbruiksknopen.

5 Resultaten scenario's watermodel (PVC)

5.1 Scenario 7a: uitgangssituatie PVC

In netwerkplaatjes worden op de knopen met verbruik (11287 knopen in totaal) de waarden van de verschillende criteria getoond. Ook in de rest van dit hoofdstuk worden de analyses alleen gedaan op knopen waarop verbruik zit.

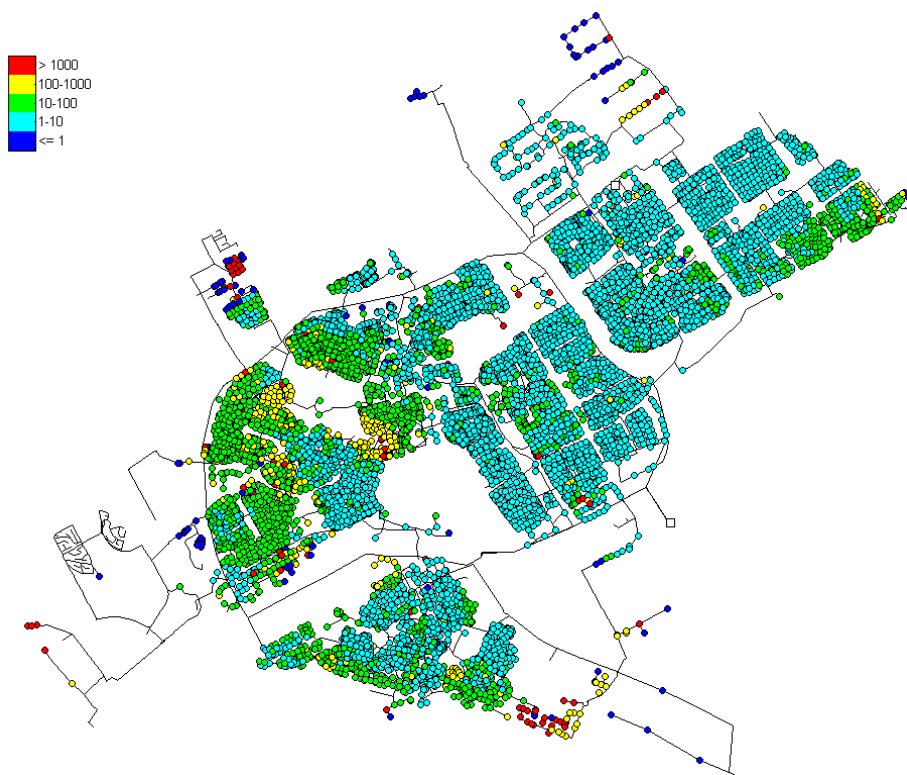
In de uitgangssituatie is de temperatuur (Figuur 5-1) in een groot deel van het net gelijk aan de bodemtemperatuur van 28 °C en dit is ook vrijwel gedurende de gehele dag het geval (Figuur 5-2). Vlak bij de pompstations en op de grote transportleidingen is de temperatuur nog laag. Voor de groei van de m.o. (Figuur 5-3, Figuur 5-4) lijkt de combinatie van verblijftijd en de temperatuur van belang. Scenario 15+ (met verhoogde temperatuur af pompstation) wordt apart toegelicht in § 5.6.



Figuur 5-1. Temperatuur op alle knopen om 0:00 (°C).



Figuur 5-2. Aantal uren per dag dat de temperatuur boven 25 °C is op alle knopen.



Figuur 5-3. Aantal m.o. type I op alle knopen om 0:00.



Figuur 5-4. Aantal m.o. type II op alle knopen om 0:00.

5.2 Maatregelen op het gehele leidingnet

Figuur 5-5a en b laat het temperatuurverschil zien tussen de uitgangssituatie en de specifieke maatregel. Een waarde van 2 op de x-as betekent dat in het maatregelscenario een 2 °C lagere temperatuur wordt gevonden dan in de uitgangssituatie. De waarde op de y-as geeft aan hoeveel aansluitingen dit temperatuurverschil heeft. Bijvoorbeeld: bij isolatie volgens scenario 7b, blijkt dat 70% van de aansluitingen (y-as) een temperatuurverschil heeft van minstens 2°C (x-as) met de uitgangssituatie.

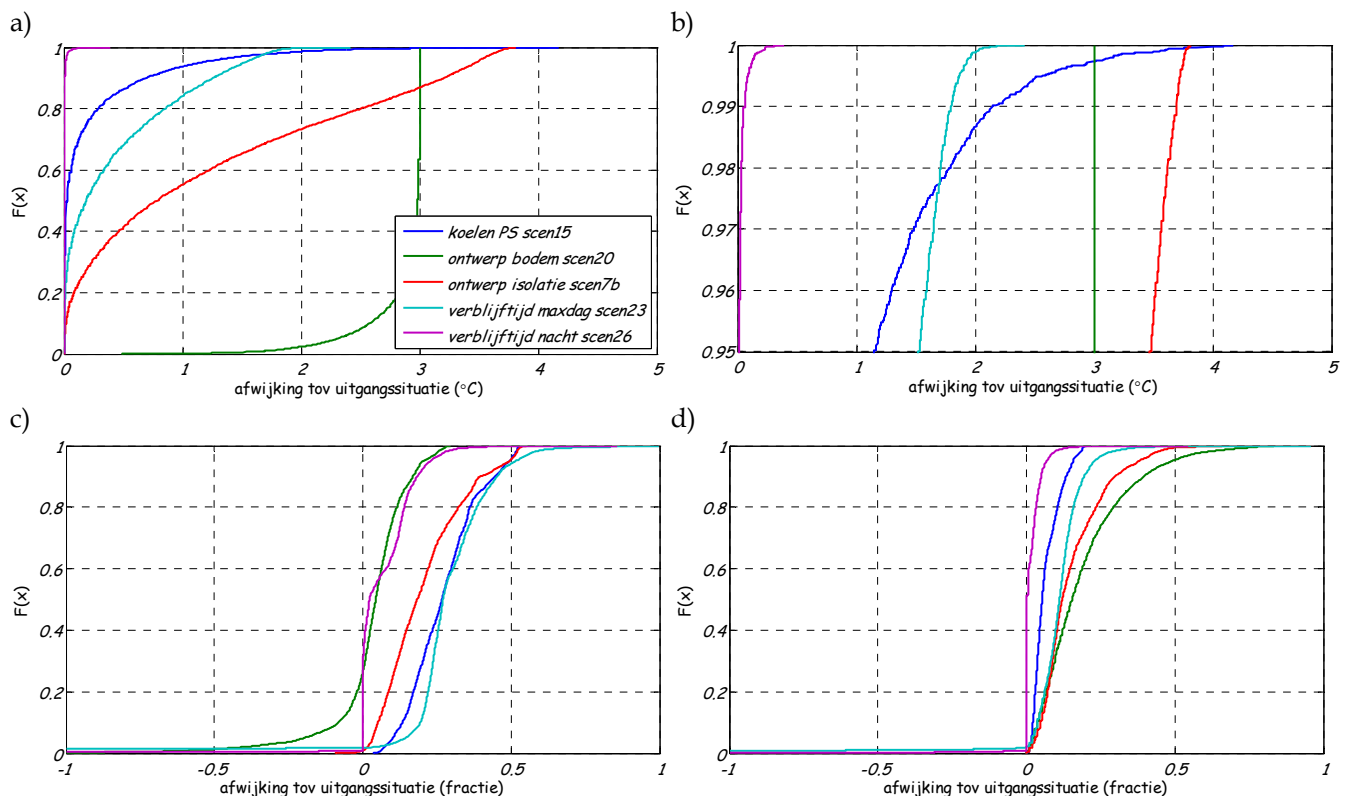
De figuur laat zien, dat de temperatuur het sterkst wordt beïnvloed door het verlagen van de bodemtemperatuur. Op de tweede plaats staat extra isolatie aanbrengen (grotere wanddikte), gevolgd door het verkorten van de verblijftijd over de gehele dag en het koelen af pompstation. Het verkorten van de verblijftijd in de nacht heeft vrijwel geen invloed.

Figuur 5-5c en d laat de groei van de m.o. zien. Een waarde van 1 op de x-as betekent dat 100% minder m.o. gevonden worden in het geval van een specifieke maatregel ten opzichte van de uitgangssituatie; een waarde van 0 betekent geen verschil en een negatieve waarde betekent dat in het maatregelscenario meer m.o. groeien. De waarde op de y-as geeft weer aan hoeveel aansluitingen deze fractie van de oorspronkelijke m.o. heeft.

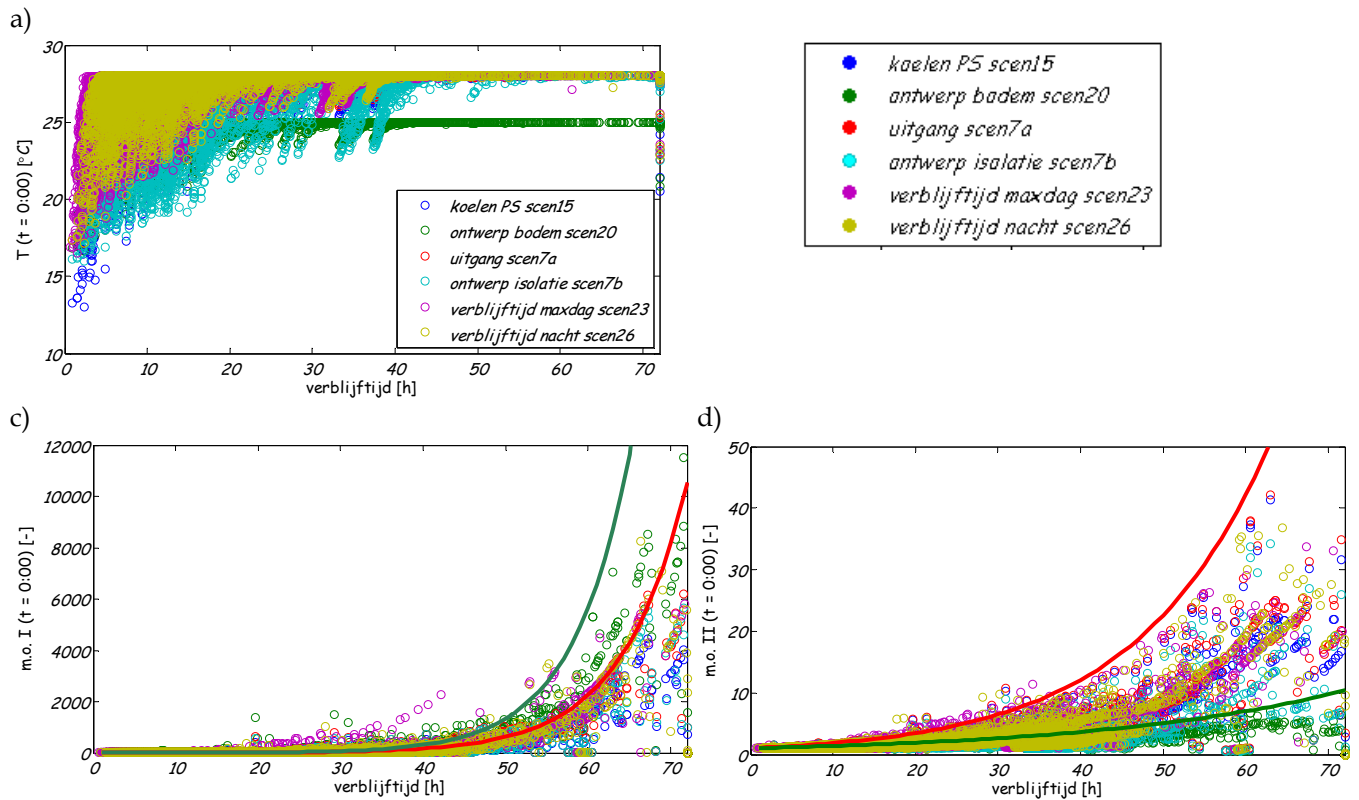
Op de groei van m.o. I hebben koelen af pompstation en verkorten van de verblijftijd (max dag) een gelijke invloed. De groei van de m.o. wordt sterk beïnvloed door de isolatie, maar ook door de verblijftijd (minder tijd om te groeien) en de bodemtemperatuur. De verblijftijd verkorten met 10% extra verbruik over de gehele dag (max dag scenario) heeft een grotere invloed dan de verblijftijd verkorten door 5% extra verbruik in de nacht (scenario verblijftijd nacht). Omdat m.o. type I (Figuur 5-5c) een optimale groeisnelheid heeft bij 25 °C geeft scenario 6 hier een verslechtering te zien; voor m.o. type II is er wel een vermindering in groei bij dit scenario. Koelen af pompstation draagt in het PVC-scenario wel bij aan het beperken van de groei van m.o. (met name type I). Isolatie volgt als effectieve maatregel. Verlagen van de bodemtemperatuur en verkorten van verblijftijd in de nacht hebben het minste invloed. Voor m.o. II is de volgorde van effectiviteit anders. Het verlagen van de bodemtemperatuur heeft de

meeste invloed, gevolgd door isolatie, verblijftijd (max dag), koelen af pompstation en ten slotte de verblijftijd in de nacht.

Figuur 5-6 laat de relatie zien tussen de verblijftijd en de verschillende criteria. De verblijftijd is van invloed op de temperatuur in de scenario's met PVC-leidingen. Figuur 5-6a laat zien dat er locaties zijn met een korte verblijftijd en hoge temperaturen, maar ook met een korte verblijftijd en met relatief lage temperaturen. Dit komt doordat ook het voorafgaande traject van invloed is; wanneer in dat traject grote diameters zitten zal de temperatuur minder snel toenemen dan wanneer er kleine diameters aanwezig zijn (bij dezelfde verblijftijd, dus bij verschillende volumestromen). De verblijftijd is van grote invloed op de groei van de m.o. Voor de scenario's met gietijzer waarbij de watertemperatuur vrijwel constant is volgt de groeicurve de voorspelde curve (de doorgetrokken lijnen in Figuur 4-6c en d), voor een netwerk van PVC-leidingen is dit niet het geval. Hier speelt een combinatie van verblijftijd en temperatuur een rol (Figuur 5-6c en d).



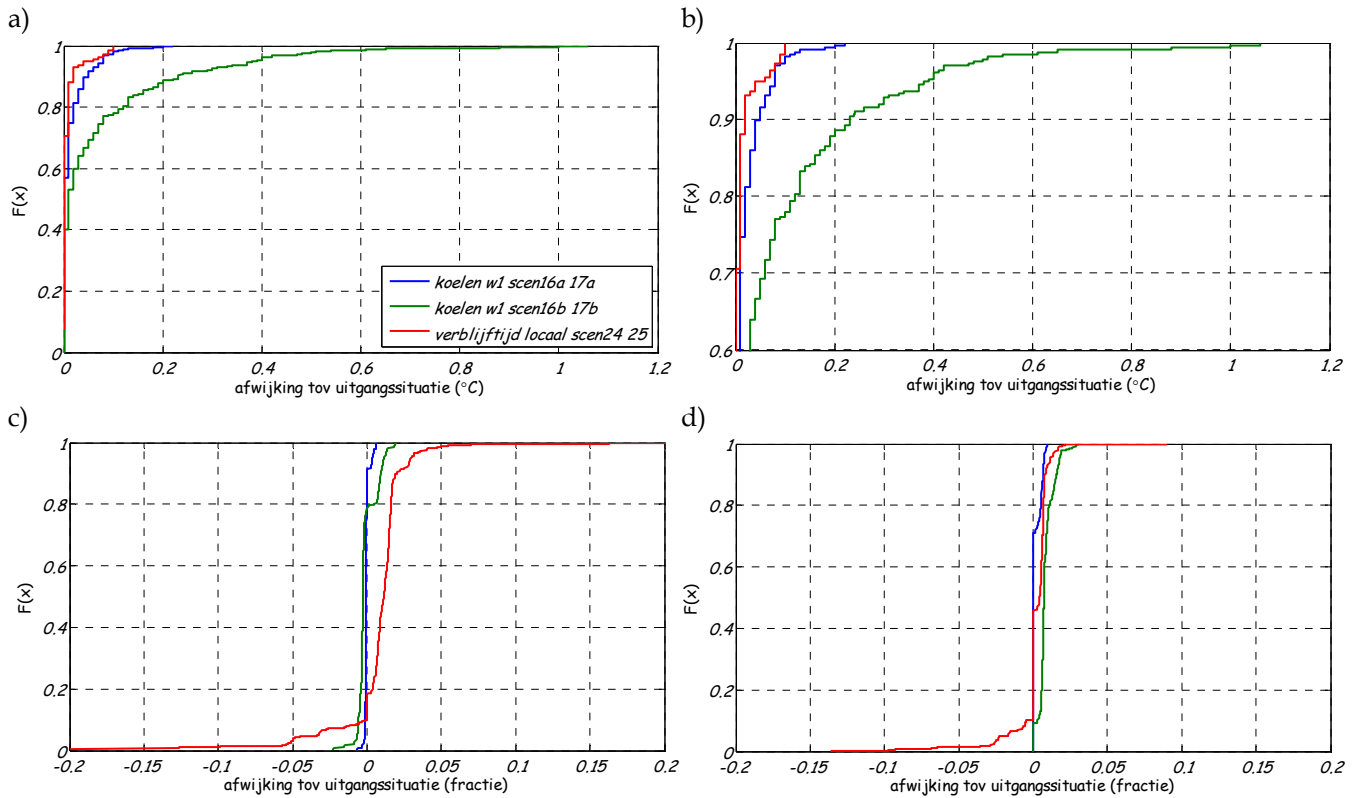
Figuur 5-5. Vergelijking van scenario's met uitgangssituatie (scenario 0) op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur b) idem, maar ingezoomd op de y-as; c) verschil (fractie) van aantal m.o. type I in scenario 0 en de globale scenario's en d) verschil (fractie) van aantal m.o. type II in scenario 0 en de globale scenario's.



Figuur 5-6. Relatie tussen verblijftijd en de verschillende criteria voor de verschillende globale scenario's op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur; c) aantal m.o. type I en d) aantal m.o. type II. De doorgetrokken lijnen geven de voorspelling aan van de groei bij 28 °C (rode lijn) en 25 °C (groene lijn).

5.3 Maatregelen op wijkniveau

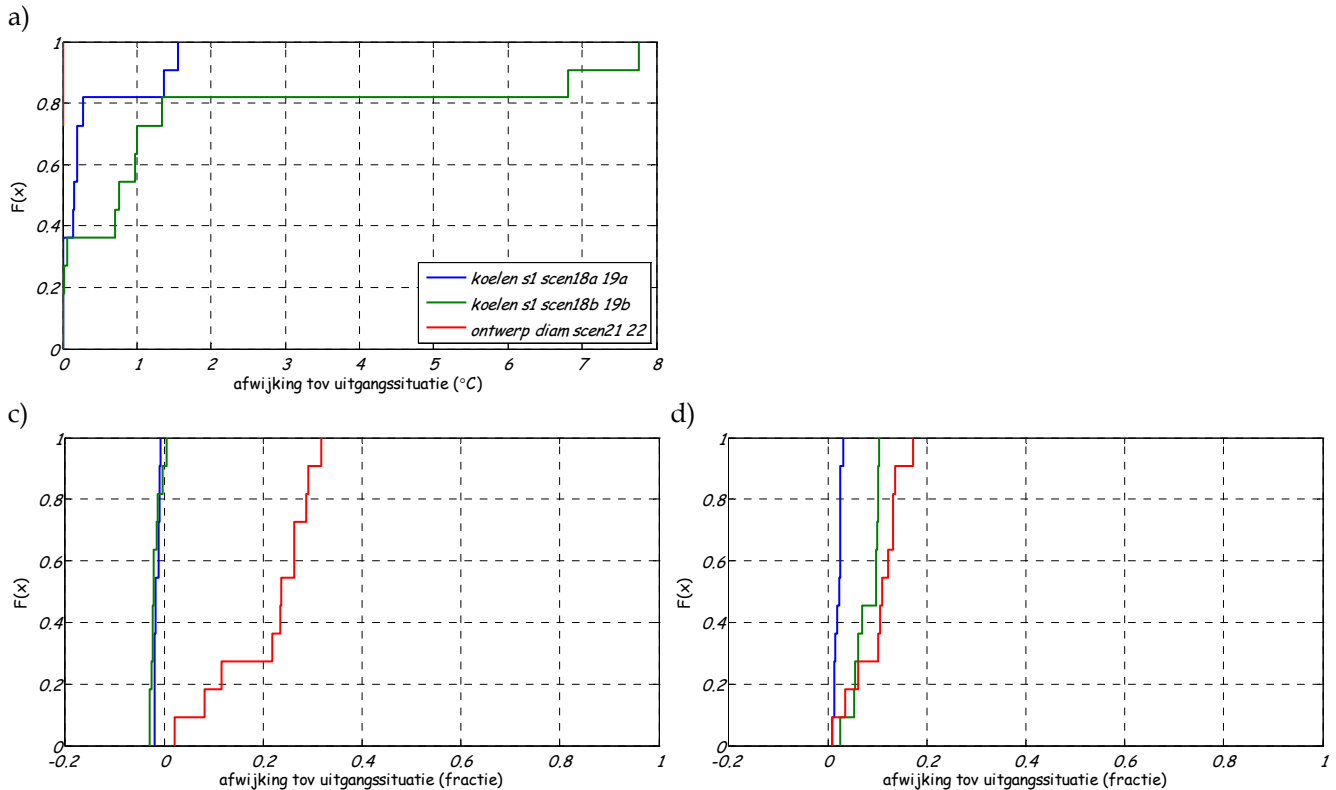
De maatregelen op wijkniveau beïnvloeden de temperatuur, zie Figuur 5-7b; vooral het koelen met een ΔT van 10 °C is van invloed. Het verkorten van de verblijftijd heeft het grootste positieve effect op de groei van de m.o. (Figuur 5-7c en d), maar dit is wel minder dan bij de globale maatregelen uit de vorige paragraaf. D.w.z. op maar een beperkt aantal knopen is een verbetering merkbaar.



Figuur 5-7. Vergelijking van scenario's met uitgangssituatie (scenario 0) op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur b) idem, maar ingezoomd op de y-as; c) verschil (fractie) van aantal m.o. type I in scenario 0 en de lokale scenario's en d) verschil (fractie) van aantal m.o. type II in scenario 0 en de lokale scenario's. Analyse op 336 verbruikersknopen (2494 adressen).

5.4 Maatregelen op straatniveau

De maatregelen op straatniveau beïnvloeden de temperatuur (Figuur 5-8a) op de direct achterliggende knopen duidelijk (koelen met een ΔT van 2 of 10 °C); het verkorten van de verblijftijd door kleinere diameters heeft geen effect. Dit komt doordat het verkleinen van de diameter de verblijftijd en de opwarmtijd even sterk beïnvloedt; het netto effect op de eindtemperatuur is daarom 0. Het verkorten van de verblijftijd door een kleinere diameter te gebruiken heeft een groot effect op de groei van de m.o. (Figuur 5-8c en d). Voor m.o. I heeft het koelen een enigszins negatief effect.



Figuur 5-8. Vergelijking van scenario's met uitgangssituatie (scenario 0) op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur; c) verschil (fractie) van aantal m.o. type I in scenario 0 en de lokale scenario's en d) verschil (fractie) van aantal m.o. type II in scenario 0 en de lokale scenario's. Analyse op 11 verbruiksknopen (49 adressen).

5.5 Vergelijken van maatregelen op lokaal niveau

Om de effecten van de verschillende maatregelen op lokaal niveau te kunnen beoordelen en te kunnen inschatten wat het effect is wanneer lokale maatregelen breed worden ingezet, zijn in Figuur 5-9 en Figuur 5-10 de lokale effecten van de maatregelen getoond. Uitgezet is de temperatuurverhoging op de knopen na knoop '0' (de knoop aan het begin van de straat, de 1^e knoop voor de gekoelde leiding, 1^e knoop voor kleinere diameter etc.), dus op de knopen in de straten waarop is ingezoomd in de Danswijk en de Muziekwijk. Voor de groei van de m.o. is gekeken naar de groei ten opzichte van de hoeveelheid op de knoop aan het begin van de straat (aantal m.o. op de knopen gedeeld door het aantal m.o. op knoop '0'). Er wordt dus alleen gekeken naar wat er in de laatste streng gebeurt, wat er tussen pompstation en knoop '0' is gebeurd wordt buiten beschouwing gelaten.

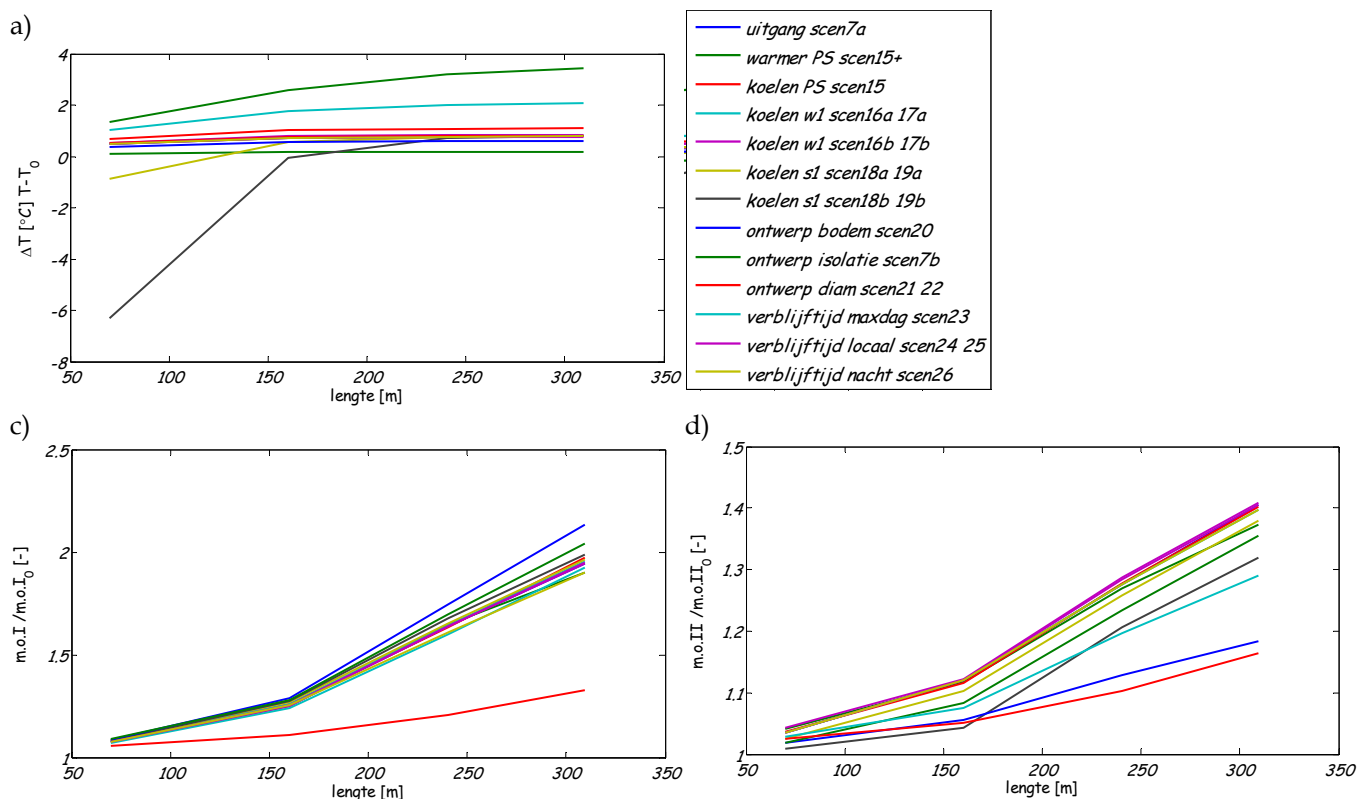
Het scenario waarin lokaal gekoeld wordt (scenario 18 en 19) heeft een groot effect op de eerste knoop na de leiding, maar daarna is het effect al zeer beperkt. In het scenario met isolatie (scenario 7b) neemt de temperatuur nog toe na knoop '0', omdat de eindtemperatuur nog niet bereikt was. In de Danswijk, dichtbij PS, heeft het max dag scenario (23) ook een negatief effect op de temperatuur. Dit komt doordat op knoop '0' het temperatuurverschil tussen water en bodem nog relatief groot is en dus de opwarming

sneller verloopt. Alle andere scenario's hebben een beperkt effect op de temperatuur ($< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Het verkleinen van de diameter (scenario 21, 22) heeft het grootste effect op de groei van de m.o.

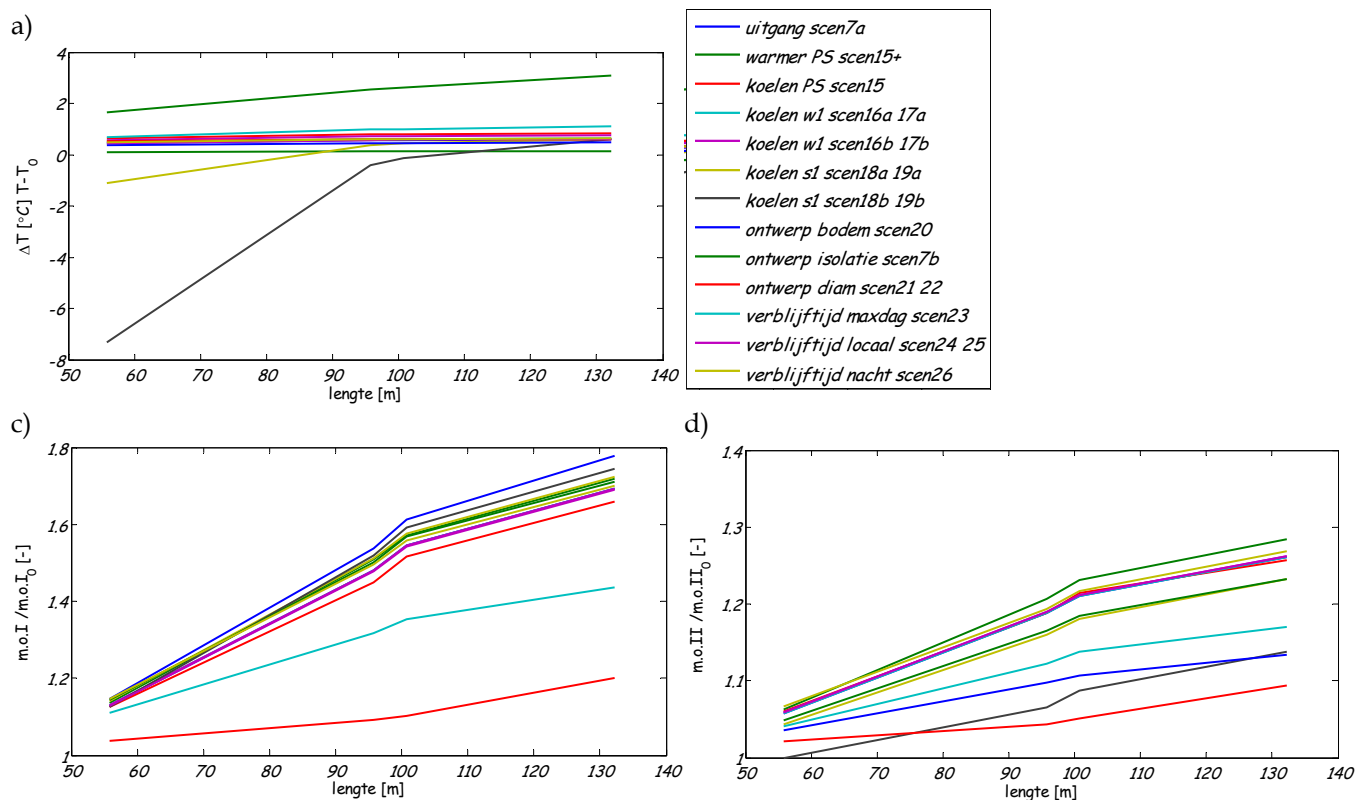
In de Danswijk (dichtbij het pompstation, Figuur 5-9) heeft het verlagen van de bodemtemperatuur (scenario 20) een effect op het beperken van de groei van m.o. I. Voor de groei van m.o. II blijkt dat de verlaagde bodemtemperatuur (scenario 20) een positieve invloed heeft op de laatste meters in het leidingnet.

In de Muziekwijk (ver van het pompstation, Figuur 5-10) heeft het verlagen van de bodemtemperatuur (scenario 20) het meeste effect op het beperken van de groei van m.o. I. Een positief effect heeft het verkorten van de verblijftijd door 10% verhoogd verbruik op de max dag (scenario 23). Voor de groei van m.o. II is meer gradatie zichtbaar in de effecten van de verschillende maatregelen. Het lokaal koelen met $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ heeft een duidelijk positief effect (scenario 19).

Het verkleinen van de diameter heeft dus nauwelijks invloed op de temperatuur maar door het verkorten van de verblijftijd wel een zeer belangrijke bijdrage aan het beperken van de groei van de m.o.



Figuur 5-9. Vergelijking van scenario's met criterium op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat in de Danswijk; a) verschil in temperatuur; c) ratio van aantal m.o. type I en d) ratio van aantal m.o. type II. Analyse op 4 verbruiksknopen.



Figuur 5-10. Vergelijking van scenario's met criterium op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat in de Muziekwijk; a) verschil in temperatuur; c) ratio van aantal m.o. type I en d) ratio van aantal m.o. type II. Analyse op 4 verbruiksknopen.

5.6 Scenario 15+

In Scenario 15+ is de temperatuur van het water af pompstation 25°C. Dit schetst de situatie waarbij oppervlaktewater wordt gebruikt en het oppervlaktewater in de zomer een hoge temperatuur heeft gekregen. In de situatie met een verhoogde temperatuur af pompstation is de temperatuur (Figuur 5-11) in een groter deel van het net gelijk aan de bodemtemperatuur van 28 °C dan in de uitgangssituatie het geval was en dit is ook gedurende de gehele dag het geval (niet getoond). Voor de groei van de m.o. (Figuur 5-12 en Figuur 5-13) is de invloed van de initiële temperatuur af pompstation van groot belang; de groei is vanaf het begin van het traject daardoor al sneller en dit leidt tot hogere aantallen m.o. dan in de uitgangssituatie.

Het is van belang om te weten of het zin heeft om het water af pompstation te koelen als oppervlaktewater gebruikt wordt. Door de uitkomsten van scenario 7a+ met een temperatuur af pompstation van 25°C, te vergelijken ten opzichte van de uitgangssituatie 7a, met een temperatuur van 15°C, wordt een indruk gekregen van de effectiviteit van het koelen van het water af pompstation wanneer oppervlaktewater gebruikt wordt. In Figuur 5-14 is het effect van koelen (scenario 7a) weergegeven ten opzichte van de uitgangssituatie, waarin het oppervlaktewater een hoge temperatuur heeft van 25°C. Uit Figuur 5-14a blijkt dat op meer dan de helft van de aansluitingen een lagere temperatuur heerst. Daarnaast is op alle aansluitingen een reductie van het aantal m.o. waar te nemen (Figuur 5-14b en c). Door te koelen is het water een kortere tijd bij een hoge temperatuur, en uit de figuren blijkt dat dit een effectieve maatregel is om de kans op nagroei te verkleinen bij het gebruik van oppervlaktewater.



Figuur 5-11. Temperatuur op alle knopen om 0:00 (°C).

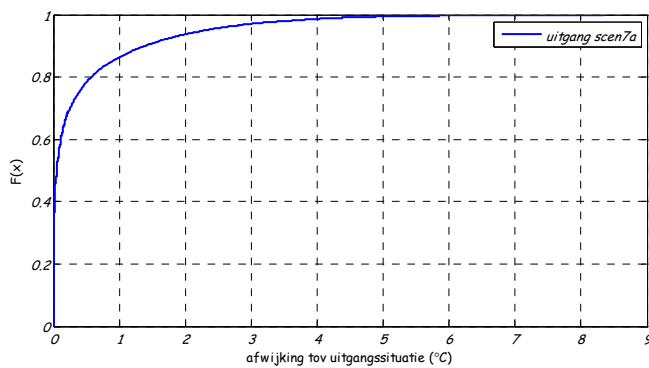


Figuur 5-12. Aantal m.o. type I op alle knopen om 0:00.

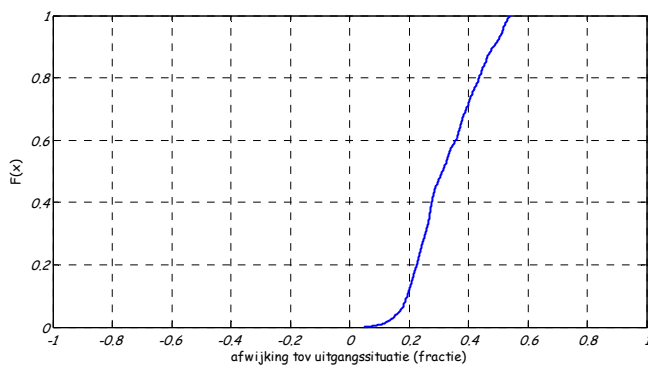


Figuur 5-13 Aantal m.o. type II op alle knopen om 0:00.

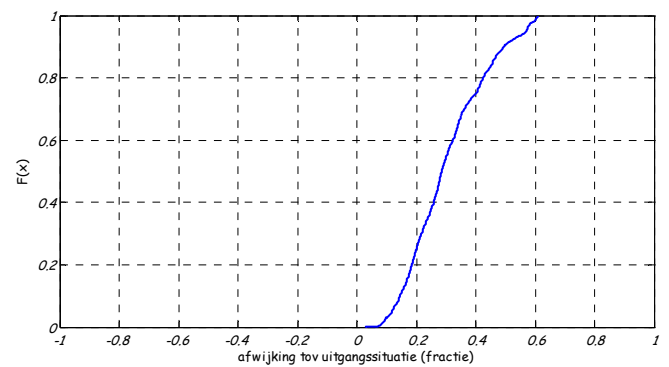
a)



b)



c)



Figuur 5-14 Vergelijking van scenario 15+ met uitgangssituatie (scenario 7a) op tijdstip 0:00; a) verschil in temperatuur; b) verschil (fractie) van aantal m.o. type I in scenario 15+ en scenario 7a en c) verschil (fractie) van aantal m.o. type II in scenario 15+ en scenario 7a.

6 Scenario's voor het bodemmodel

6.1 Inleiding

Het drinkwater dat door een leiding in de grond stroomt wordt opgewarmd doordat de omringende bodem door hoge temperaturen en zonnestraling via opwarming van het asfalt/grondbedekking wordt opgewarmd. Een groot aantal factoren speelt bij deze opwarming een rol, zoals in Figuur 1-1 te zien is.

Het bodemmodel beschrijft de opwarming van de bodem op verschillende dieptes op basis van de factoren die zichtbaar zijn in de schematische weergave in de figuur. Met het model kan op elke locatie de bodemtemperatuur op elke willekeurige diepte berekend worden. De invoer die het bodemmodel nodig heeft zijn meteorologische gegevens, zoals luchttemperatuur, straling en windsnelheid. Hiervoor kunnen historische gegevens van het KNMI gebruikt worden of weersvoorspellingen. Andere invoergegevens, zoals albedo, aanwezigheid van vegetatie, de aanwezigheid van gebouwen en de grondsoort kunnen aangepast worden aan de te onderzoeken situatie.

Het voorkomen van de opwarming van het drinkwater, dat centraal staat in dit project, kan gericht zijn op het vertragen van de opwarming van de omringende bodem. Dit kan bereikt worden door ontwerpeisen aan te passen, zoals diepere ligging van de leidingen, andere grondsoort gebruiken, vegetatie aanbrengen, aanpassen van de albedo door het witverven van het straatoppervlak. Scenariostudies zijn ontwikkeld om de effectiviteit van deze maatregelen te onderzoeken. In Tabel 6-1 zijn de scenario's weergegeven naast de uitgangssituatie voor het bodemmodel.

Tabel 6-1 Overzicht scenario's voor het bodemmodel gericht op het beïnvloeden van de opwarming van de bodem door het aanpassen van de ontwerpeisen.

Invoerparameters bodemmodel	Uitgangssituatie van het bodemmodel	Scenario's bij de oplossing aanpassen ontwerpeisen
weersomstandigheden	klimaatscenario voor 2050 W+	klimaatscenario voor 2050 W+
locatie leiding	platteland	platteland
afdekking (albedo)	stoep (0,13)	0,1 (rood steen) - 0,95 (wit)
bodemsoort	zand	variaties zand - veen - klei
vegetatie	geen	0-100%
diepteligging leiding	1 meter	0,5 - 2,0 meter

Voor elk scenario wordt op verschillende dieptes (0,50-2,00 m) de temperatuur van de bodem berekend met het bodemmodel. Voor elk scenario worden dan figuren verkregen zoals weergegeven in Figuur 2-1. Uit de bodemtemperaturen op elke diepte worden de volgende kenmerken afgeleid:

1. het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt,
2. de maximale temperatuur die op elke diepte bereikt wordt.

Met beide kenmerken kan een indruk gekregen worden wat de effectiviteit van elke maatregel binnen een scenario is. De kenmerken zijn zodanig gekozen dat de uitkomsten van de scenario's ook bruikbaar zijn wanneer de wettelijke norm van 25°C verschuift naar een andere temperatuurgrens. Vervolgens wordt het criterium voor het bodemmodel bepaald: bij welk scenario blijft de bodemtemperatuur onder de 25°C (Tabel 2-2).

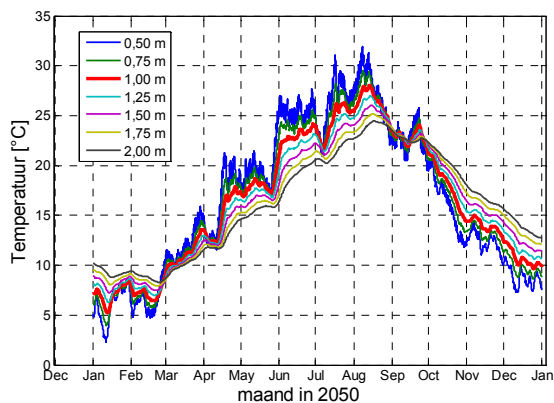
In dit hoofdstuk wordt eerst de bodemtemperatuur in de uitgangssituatie beschreven en daarna achtereenvolgens de scenario's en de resultaten behorend bij het aanpassen van de albedo, het aanpassen van de grondsoort en de aanwezigheid van vegetatie.

6.2 De bodemtemperatuur in de uitgangssituatie van het bodemmodel

In de uitgangssituatie wordt de bodemtemperatuur berekend in een plattelandsomgeving, onder een stoep, in een zandbodem, op 1 meter diepte bij het klimaatscenario 2050 W+. De weersgegevens behorend bij dit klimaatscenario zijn berekend met de datatransformatietool van het KNMI. De weergegevens van Schiphol in 2003 zijn als invoer gebruikt. De transformatietool geeft de weergegevens behorend bij de gewenste horizon en het gewenste scenario als uitvoer.

Er bestaat discussie over de juistheid van de scenario's en de datatransformatietool. Een nieuwe generatie van geactualiseerde klimaatscenario's zal beschikbaar komen in 2013 (KNMI, 2009; www.knmi.nl). Om deze reden moeten de berekende bodemtemperaturen in dit project niet bekeken worden op hun absolute waarde. In de oplossingen gaat het alleen om een relatieve verandering ten opzichte van de uitgangssituatie, zodat de effectiviteit van de maatregel zichtbaar wordt.

De bodemtemperatuur op verschillende diepten in de uitgangssituatie is te zien in Figuur 6-1. De bijbehorende kenmerken, namelijk het aantal dagen dat de temperatuur boven een bepaalde waarde komt en de maximale temperatuur op elke diepte is weergegeven in Tabel 6-2. In de uitgangssituatie is op de huidige diepteligging van de leidingen de temperatuur maximaal 28°C. De temperatuur zal 44 dagen boven de 25°C liggen.



Figuur 6-1 De voorspelde bodemtemperatuur op verschillende dieptes in de uitgangssituatie voor het bodemmodel.

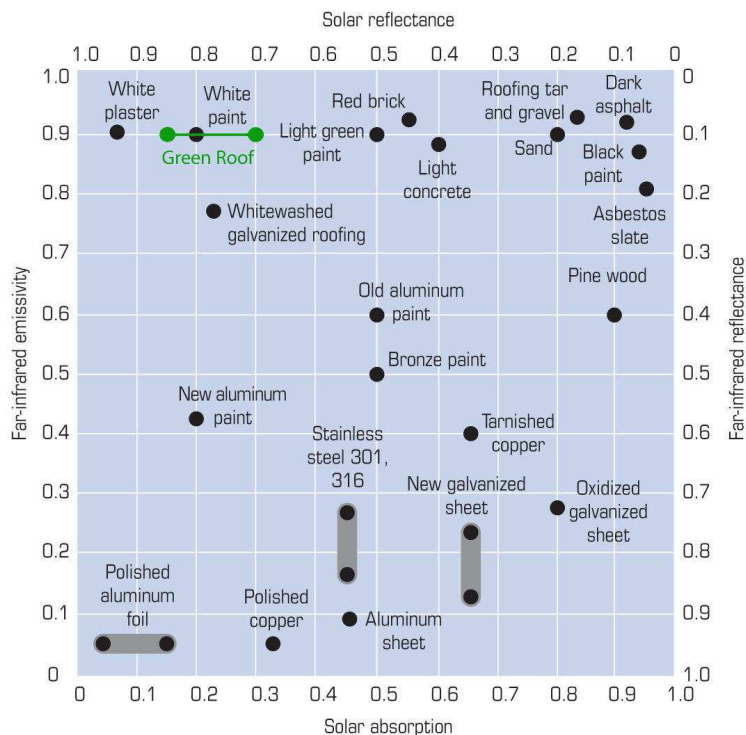
Tabel 6-2 Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt en de maximale temperatuur in de uitgangssituatie voor het bodemmodel.

Diepteligging [m]	aantal dagen boven temperatuur van					maximale temperatuur op diepte [°C]
	>20°C	>22,5°C	>25°C	>27,5°C	>30°C	
0,50	153	116	86	37	14	31,9
0,75	131	111	53	17	0	29,5
1,00	131	104	44	9	0	28,0
1,25	130	84	29	0	0	27,0
1,50	130	71	19	0	0	26,0
1,75	124	68	7	0	0	25,2
2,00	118	59	0	0	0	24,4

6.3 Scenario's voor albedo

6.3.1 Ontwikkeling van de scenario's voor albedo

De grondbedekking bepaalt de mate waarin de zonnestraling wordt gereflecteerd en geabsorbeerd. Zwart asfalt wordt warmer dan rode stenen en deze worden weer warmer dan vegetatie. Dit wordt weergegeven door de albedo. Verhard oppervlak met asfalt heeft een albedo van 0,10; een begroeid oppervlak een albedo van gemiddeld 0,19 (van der Molen, 2008). De albedo van een materiaal is gedefinieerd als de over een bepaald bereik van het golfspectrum geïntegreerde gereflecteerde straling en is afhankelijk van de kleur van een oppervlak, maar ook van de structuur. In Figuur 6-2 is de absorptie weergegeven voor verschillende bouwmaterialen, waarbij albedo = 1-absorptie (Hoffmann, 2006). Uit de figuur blijkt dat de albedo van verschillende materialen kan variëren tussen ongeveer 0,05 en 0,93. In het kader van dit project is ervoor gekozen om de volledige range van 0,10 (asfalt) tot een maximum van 0,90 door te rekenen.



Source: Florida Solar Energy Center

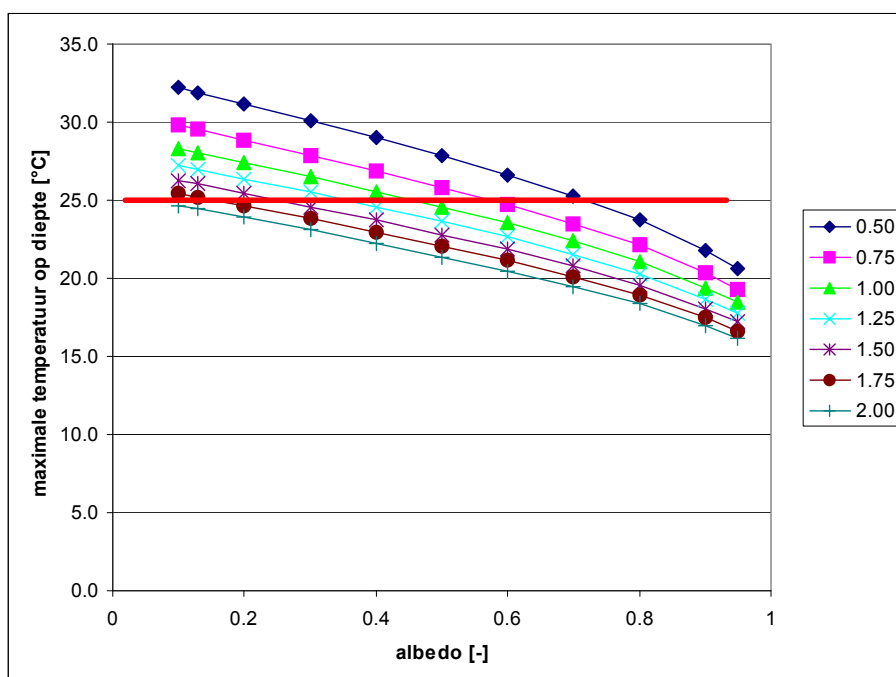
Figuur 6-2 Absorptie en emissie van bouwmaterialen uit Hoffmann (2006), waarbij albedo = 1-absorptie.

6.3.2 Resultaten van de scenario's voor albedo

Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt is in Figuur 6-4 te zien bij variërende waarde van de albedo. Op de y-as is het aantal dagen weergegeven dat een bepaalde temperatuur wordt bereikt. Voor bijvoorbeeld een albedo van 0,20, kan uit de figuur afgelezen worden dat op 50 cm diepte de temperatuur 8 dagen boven 30°C was, 26 dagen boven 27,5°C, 77 dagen boven 25°C, 112 dagen boven 22,5°C en 140 dagen boven 20°C. In Figuur 6-3 is de maximale temperatuur weergegeven bij verschillende waarden van de albedo.

Uit de figuren blijkt dat een hoge albedo gunstig is om overmatige opwarming te voorkomen. Bij een albedo van 0,90 wordt de temperatuur nauwelijks hoger dan 20°C. De figuren laten zien dat de 25°C niet wordt overschreden op 1 meter diepte bij een albedo groter dan 0,50. Een diepere ligging zorgt ervoor dat een lagere waarde van de albedo mogelijk is. Zo is bij een ligging van 1,50 m en dieper een albedo van 0,30 mogelijk. Bij de albedo van de uitgangssituatie is een diepteligging nodig van 2 meter om de 25°C te voorkomen. Een samenvatting van de vereiste albedo op elke diepte om een temperatuur van 25°C te voorkomen is weergegeven in Tabel 6-3.

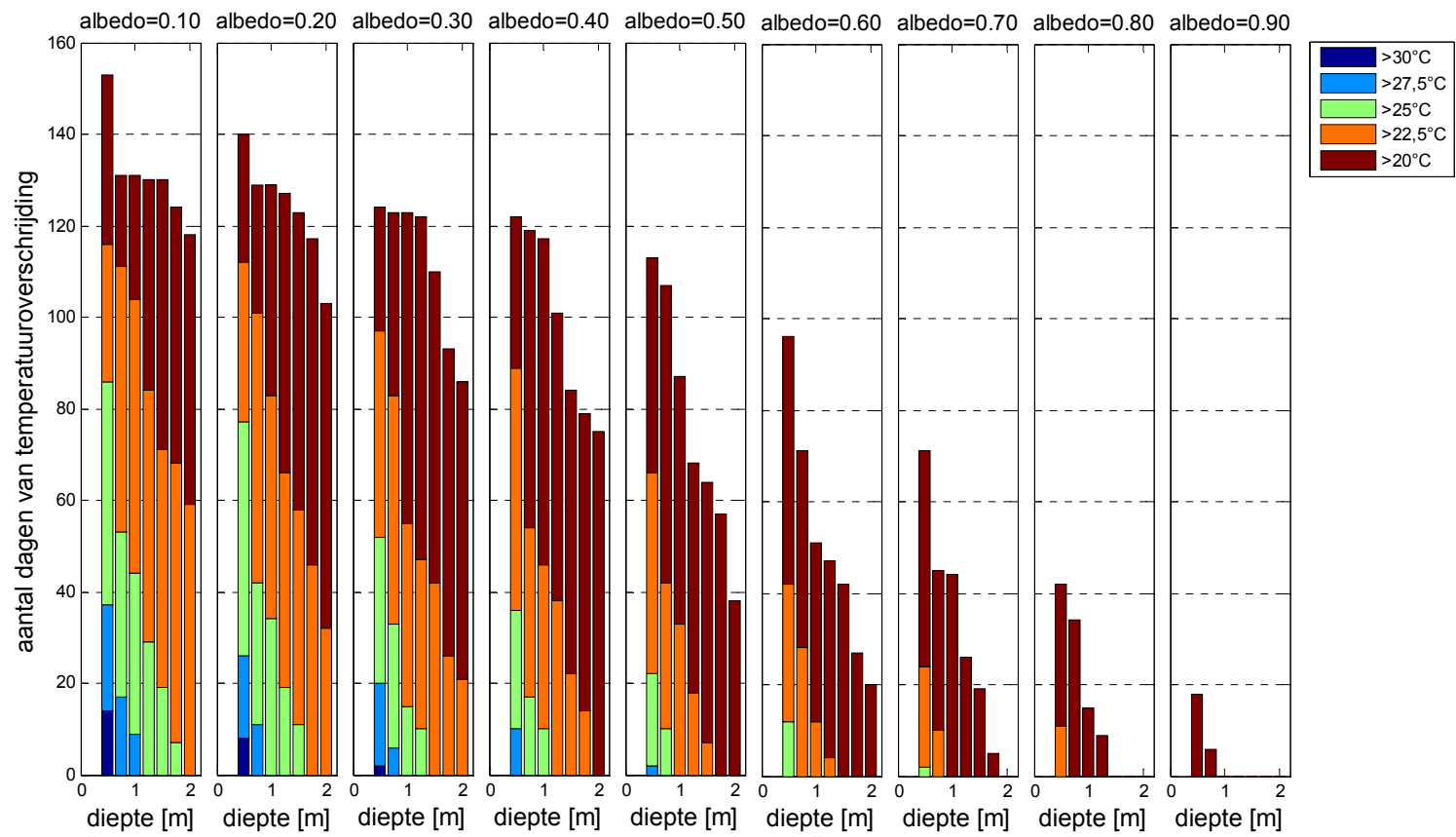
Met de figuren kunnen tevens andere temperatuurgrenzen beoordeeld worden. Bij wijzigingen van de wettelijke norm tot bijvoorbeeld 27,5°C, is een albedo van 0,20 voldoende bij een diepteligging van 1 meter.



Figuur 6-3 De maximale temperatuur op verschillende dieptes als functie van het albedo.

Tabel 6-3 De albedo waarbij de temperatuur beneden 25°C bij verschillende dieptes.

Diepteligging [m]	Albedo waarbij T<25°C
0,50	0,72
0,75	0,58
1,00	0,45
1,25	0,35
1,50	0,25
1,75	0,15
2,00	<0,1



Figuur 6-4 Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt bij verschillende waarden voor het albedo. De uitgangssituatie (albedo = 0,13) komt overeen met albedo 0,10.

De vraag is natuurlijk welk bedekkingsmateriaal er in de huidige situatie voor kan zorgen dat er geen overmatige opwarming plaatsvindt. Uit Figuur 6-2 blijkt dat de materialen die aan de vereiste waarde voor de albedo voldoen, namelijk albedo > 0,45 niet in de praktijk toegepast zullen worden als grondbedekking. Ze zijn glad of niet bestendig tegen gebruik op de grond (voetgangers, fietsen etc). Het meest praktische materiaal dat een hogere albedo waarde heeft is licht beton met een albedo van 0,40. Uit Figuur 6-4 blijkt dat dan aan de 25°C wordt voldaan op 1,25 meter diepte.

6.4 Scenario's voor grondsoort

6.4.1 Ontwikkeling van de scenario's voor grondsoort

De thermische eigenschappen van een grondsoort bepalen hoe snel de bodem rond een waterleiding opwarmt. Zand warmt het snelst op, gevolgd door klei en tenslotte veen. Het vocht in een zandbodem zorgt voor een minder snelle opwarming. De temperatuur van een vochtige zandbodem zal dus liggen tussen de temperatuur van een zandbodem en een kleibodem in.

Voor de thermische eigenschappen zijn literatuurwaarden gebruikt (Blokker en Pieterse-Quirijns, 2011). In Tabel 6-4 zijn de geleidbaarheid, warmtecapaciteit en dichtheid van de grondsoorten gegeven. De thermische diffusiviteit is de verhouding tussen de warmtegeleidbaarheid en de warmteopslag of volumetrische warmtecapaciteit:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad [m^2 / s]$$

waarin:

α	= thermische diffusiviteit	[m ² /s]
λ	= warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m.K]
ρ	= dichtheid	[kg/m ³]
C_p	= warmtecapaciteit	[J/kg.K]

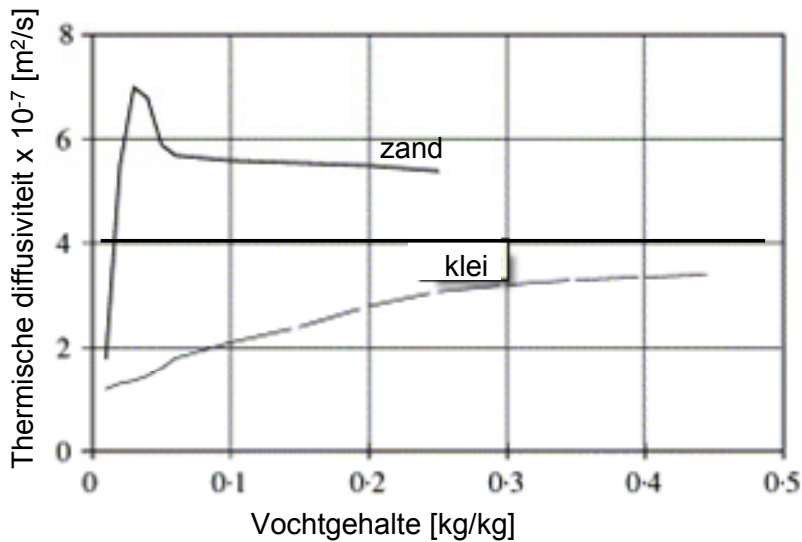
Materialen met een hoge waarde voor de thermische diffusiviteit zijn in staat om hun temperatuur snel aan te passen aan hun omgeving. Dit betekent dat hoe groter de waarde voor de thermische diffusiviteit is hoe sneller de opwarming van het materiaal gaat. De thermische diffusiviteit is dus het grootst voor zandgrond en het kleinst voor veengronden (Tabel 6-4). De thermische diffusiviteit van veen ligt dichtbij die van water, dat een thermische diffusiviteit heeft van $\alpha_{\text{water}} = 1,4 \cdot 10^{-7} [m^2/s]$, omdat in veen veel water aanwezig is.

Tabel 6-4 Thermische eigenschappen van verschillende grondsoorten: zand, klei en veen.

Bodemtype →			zand	klei	veen
Thermische eigenschap ↓					
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m.K]	2,03	0,85	0,4
ρ	dichtheid	[kg/m ³]	1,60·10 ³	1,60·10 ³	1,12·10 ³
C_p	warmtecapaciteit	[J/kg.K]	1,06·10 ³	1,40·10 ³	2,68·10 ³
<hr/>					
α	thermische diffusiviteit	[m ² /s]	12,0·10 ⁻⁷	3,79·10 ⁻⁷	1,33·10 ⁻⁷

Voor het onderzoeken van het effect van de grondsoort op de opwarming worden bodemsoorten bestaande uit een mengsel van grondsoorten ('mixed soil types') toegepast. De thermische eigenschappen voor de gemengde grondsoorten worden berekend als gewogen gemiddelden van de eigenschappen van de afzonderlijke grondsoorten, zoals beschreven door Ochsner e.a. (2001). In Tabel 6-5 zijn de thermische eigenschappen van de gemengde grondsoorten weergegeven.

De thermische eigenschappen van de bodem veranderen met het vochtgehalte. Een toename van het vochtgehalte in een zandbodem verlaagt de thermische diffusiviteit van de bodem, waardoor de opwarming trager verloopt. In Figuur 6-5 is de thermische diffusiviteit te zien voor zand en klei als functie van het vochtgehalte. Uit de figuur blijkt ook dat bij zeer lage vochtgehalten in een zandbodem, de thermische diffusiviteit heel klein wordt en de opwarming of afkoeling juist heel traag verloopt.



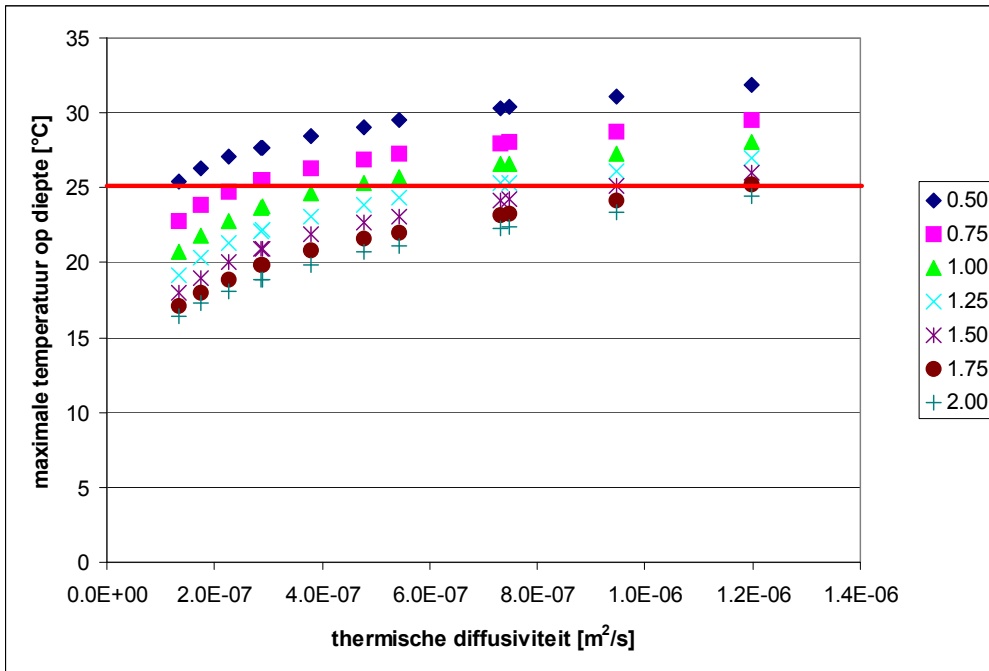
Figuur 6-5 Thermische diffusiviteit van zand en klei bij verschillende vochtgehalten (uit Abu-Hamdeh (2003)).

Tabel 6-5 Thermische eigenschappen van gemengde grondsoorten bestaande uit een mengsel van zand/klei, zand/veen en klei/veen.

Gemengde grondsoort →	zand en klei			zand en veen			klei en veen		
	75% zand + 25% klei	50% zand + 50% klei	25% zand + 75% klei	75% zand + 25% veen	50% zand + 50% veen	25% zand + 75% veen	75% klei + 25% veen	50% klei + 50% veen	25% klei + 75% veen
λ [W/m.K]	1,7	1,4	1,1	1,6	1,2	0,81	0,74	0,63	0,51
ρ [kg/m ³]	1,6·10 ³	1,6·10 ³	1,6·10 ³	1,5·10 ³	1,4·10 ³	1,2·10 ³	1,5·10 ³	1,4·10 ³	1,2·10 ³
C [J/kg.K]	1,1·10 ³	1,2·10 ³	1,3·10 ³	1,5·10 ³	1,9·10 ³	2,3·10 ³	1,7·10 ³	2,0·10 ³	2,4·10 ³
p									
α [m ² /s]	9,5·10 ⁻⁷	7,3·10 ⁻⁷	5,4·10 ⁻⁷	7,5·10 ⁻⁷	4,8·10 ⁻⁷	2,9·10 ⁻⁷	2,9·10 ⁻⁷	2,3·10 ⁻⁷	1,8·10 ⁻⁷

6.4.2 Resultaten van de scenario's voor grondsoort

Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt is in Figuur 6-7 te zien bij de gemengde grondsoorten. Op de y-as is het aantal dagen te zien dat een bepaalde temperatuur wordt gehaald. In de uitgangssituatie (100% zandgrond) bijvoorbeeld komt op 50 cm de temperatuur 14 dagen boven 30°C, 37 dagen boven 27,5°C, 86 dagen boven 25°C, 116 dagen boven 22,5°C en 153 dagen boven 20°C. In Figuur 6-6 is de maximale temperatuur weergegeven bij verschillende waarden van de thermische diffusiviteit.



Figuur 6-6 De maximale temperatuur op verschillende dieptes als functie van de thermische diffusiviteit van de bodem.

Uit Figuur 6-7 blijkt dat in zandbodems de opwarming het grootst is. In een 100% zandbodem wordt de 25°C norm op 1 meter diepte overschreden. Mengingen met een andere grondsoort heeft geen zin als de andere grondsoort klei is: bij alle mengsels bestaande uit zand en klei wordt de 25°C norm op 1 meter diepte overschreden. Mengingen met veen heeft alleen zin als het overgrote deel bestaat uit veen (75%). Bodems bestaande uit klei, veen of mengsels van beide grondsoorten voldoen altijd aan de 25°C norm bij een diepte van 1 meter.

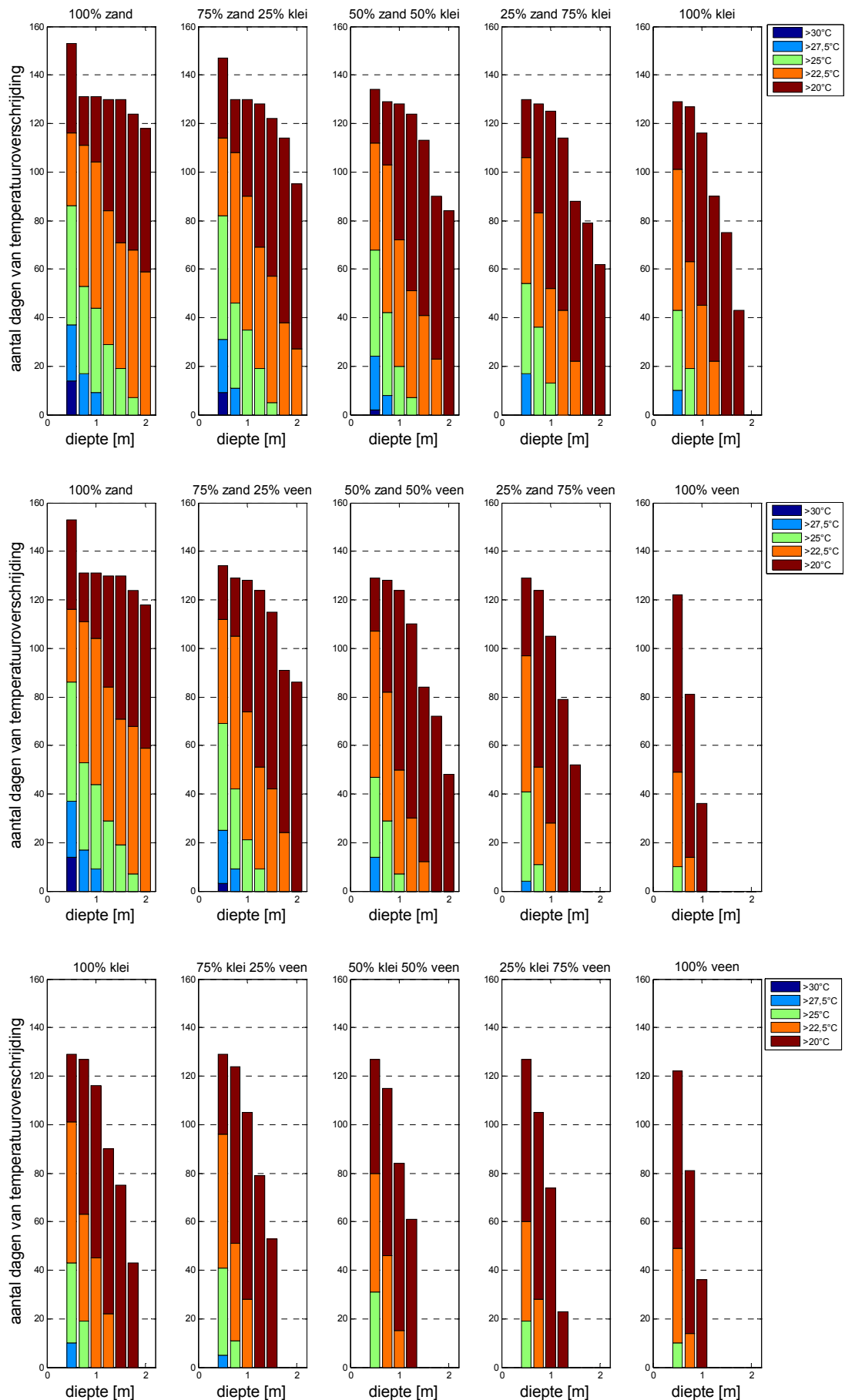
In bodems met zand kan wel voldaan worden aan de 25°C norm als de diepte wordt veranderd. Een combinatie van Figuur 6-7 en Figuur 6-6 laat zien dat in 100% zandbodem aan de norm wordt voldaan bij een diepteligging dieper van 1,75 meter. In een 50% zand-50% klei bodem is een ligging dieper dan 1,25 meter voldoende en bij een 50% zand-50% veen bodem is een ligging dieper dan 1 meter voldoende om een temperatuur van 25°C te voorkomen. In bodems van klei is een diepteligging 1 meter en dieper voldoende. In gemengde grond bestaande uit 50% klei-50% veen is 0,75 m en dieper voldoende en in 100% veengrond is een diepteligging van 0,50 m toereikend.

De figuren laten duidelijk zien dat de opwarming van de bodem sterk afhankelijk is van de thermische eigenschappen van de bodem. Het is daarom belangrijk om een goede inschatting te hebben van de thermische eigenschappen van de bodem waarin de distributieleiding ligt. Uit Figuur 6-6 volgt dat een bodem met een thermische diffusiviteit kleiner dan $4,5 \cdot 10^{-7}$ [m²/s] voldoet aan de 25°C norm op 1 meter diepte. Met behulp van Tabel 6-4 en Tabel 6-5 kan dan dezelfde conclusie getrokken worden als hierboven: bodems met zand voldoen alleen aan deze grens voor de thermische diffusiviteit bij menging

met een overmaat aan veen zodat naar verhouding meer dan 75% van de resulterende grond bestaat uit veen. Klei- en veengronden voldoen altijd aan deze grens.

Het vochtgehalte van de bodem beïnvloedt de thermische diffusiviteit (Figuur 6-5). Als de thermische diffusiviteit van een vochtige bodem bekend is kan in Figuur 6-6 afgelezen worden wat de verwachte maximale temperatuur is van de bodem op verschillende dieptes. Een vochtige zandbodem met een thermische diffusiviteit van bijvoorbeeld $8 \cdot 10^{-7}$ [m²/s] zal op 1 meter diepte een temperatuur bereiken van ongeveer 27°C. Aan het criterium van 25°C wordt in dit grondtype dan voldaan bij een diepteligging van ongeveer 1,35 meter.

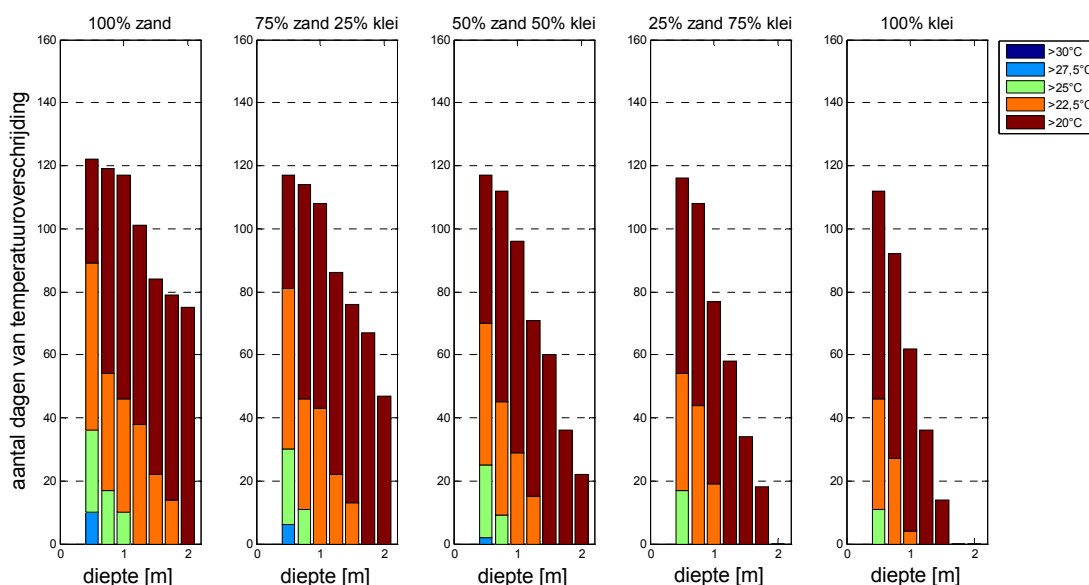
Met de figuren kunnen tevens andere temperatuurgrenzen beoordeeld worden. Bij wijzigingen van de wettelijke norm voor de drinkwatertemperatuur tot bijvoorbeeld 27,5°C, is in een zandbodem een diepteligging van 1,25 meter voldoende. Mengingen met kleine hoeveelheden klei en veen hebben dan zeker nut om een diepte van 1 meter te behouden.



Figuur 6-7 Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt in gemengde grondsoorten. De uitgangssituatie komt overeen met 100% zandgrond.

6.4.3 Resultaten van de scenario's voor een combinatie van albedo en grondsoort

Uit de scenario's met albedo bleek dat in de praktijk een maximale albedo van de afdekking bereikt kan worden van 0,40 bij het gebruik van licht beton, terwijl een albedo > 0,45 gewenst is voor een diepteligging van 1 meter in zandgrond. Tevens zal een klei- en/of veengrond zoals uit de scenario's met de grondsoort volgt niet wenselijk zijn in de praktijk. Daarom zijn scenario's berekend uitgaande van de praktisch realiseerbare albedo van 0,40 in zandbodems, gemengd met klei. In Figuur 6-8 is te zien dat in het geval van het verhogen van de albedo tot 0,40, in volledige zandgrond een diepteligging van 1,25 meter nodig zou zijn. Een menging met klei tot een gemengde grondsoort van 75% zand met 25% klei is voldoende om aan de 25°C norm te voldoen op 1 meter diepte. In zandbodems met een hoge grondwaterstand, dat leidt tot vochtig zand, zal ook op 1 meter diepte aan de 25°C norm worden voldaan. Een hoger vochtgehalte in een zandbodem leidt immers tot een lagere waarde voor de thermische diffusiviteit (Figuur 6-5), die overeenkomt met de thermische diffusiviteit van gemengde zand-klei bodems (Tabel 6-5).



Figuur 6-8 Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt in gemengde grondsoorten van zand met klei en een aangepast albedo van 0,40.

6.5 Scenario's voor vegetatie

6.5.1 Ontwikkeling van de scenario's voor vegetatie

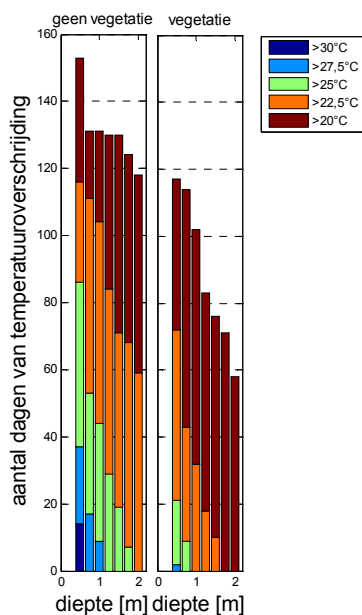
Begroeiing van het oppervlak van de bodem zorgt voor een minder snelle opwarming van de bodem. Hiervoor zijn twee redenen: de albedo van begroeiing (0,19) is hoger dan van asfalt, waardoor een kleinere absorptie van warmte door begroeiing plaatsvindt. Daarnaast verdampen planten water waarvoor energie nodig is. Door de verdamping blijft er minder energie over om de bodem op te warmen. De bodem zal daardoor minder hoge temperaturen bereiken.

Om het effect van begroeiing te onderzoeken wordt het bodemmodel uitgebreid met het verlies van energie door verdamping (van der Molen, 2008) en wordt de albedo aangepast. De bodemtemperatuur in aanwezigheid van begroeiing/vegetatie wordt vergeleken met de uitgangssituatie (geen vegetatie).

6.5.2 Resultaten van de scenario's voor vegetatie

Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt is in Figuur 6-9 te zien voor de uitgangssituatie en voor de situatie waarin vegetatie is aangebracht. Op de y-as is het aantal dagen te zien dat een bepaalde temperatuur wordt gehaald. In de

uitgangssituatie (100% zandgrond) bijvoorbeeld komt de temperatuur op 1 meter diepte 0 dagen boven 30°C, 9 dagen boven 27,5°C, 44 dagen boven 25°C, 104 dagen boven 22,5°C en 131 dagen boven 20°C.



Figuur 6-9 Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt wanneer geen vegetatie aanwezig is (uitgangssituatie) en wanneer het opperolak begroeid is.

Uit de figuur blijkt dat het aanbrengen van vegetatie zorgt voor een aanzienlijke verlaging van de bodemtemperatuur. Kortom, vegetatie leidt tot een minder sterke opwarming. Op 1 meter diepte wordt de 25°C niet meer behaald, terwijl in de uitgangssituatie op 44 dagen een temperatuur boven 25°C wordt bereikt.

7 Scenario's wetgeving

7.1 Inleiding

Waterleidingbedrijven zijn verantwoordelijk voor het leveren van het water tot aan de watermeter. Ten behoeve van de wettelijke bemonstering wordt de temperatuur van het water gemeten bij de meest gebruikte kraan, meestal de keukenkraan, na voldoende doorstroming. In principe wordt dan dus de temperatuur van het water in het leidingnet gemeten.

In de voorgaande hoofdstukken is de opwarming van het drinkwater in het distributienet beschreven onder invloed van de te verwachten klimaatveranderingen en eigenschappen in het distributienet, zoals ontwerp- en operatieparameters (diameter, diepteligging, stromingssnelheid, verbruik). In de praktijk vindt ongewenste opwarming van het drinkwater in het distributienet soms ook plaats door de aanwezigheid van stadsverwarming in de bodem.

Ongewenste opwarming van leidingwater in woningen kan op verschillende manieren plaatsvinden, ondanks het feit dat verblijftijden in de binneninstallatie relatief kort zijn. Ten eerste doordat het water opgewarmd wordt door slechte ventilatie in de meterkast of omdat de watermeter zich bovenin de meterkast bevindt. Ten tweede doordat stilstaand water onder invloed van de luchttemperatuur in de woning wordt opgewarmd. Ten derde doordat in de woning drinkwaterleidingen zich in de nabijheid van warmwater-circulatieleidingen of vloerverwarmingleidingen kunnen bevinden. Bij gestapelde woningbouw is het risico op opwarming van de drinkwaterinstallatie door de warmtelevering groter dan bij laagbouw. Door de aanwezigheid van doorgaande stijgleidingen van de warmtedistributie is de warmteafgifte in de meterruimte groter. Het risico van opwarming is nog groter in gebouwen met een verhoogd temperatuurregime, zoals bejaardenhuizen en verzorgingshuizen.

In dit hoofdstuk worden de wettelijke eisen beschreven voor de afstand tussen warmtebron en het leidingnet. Eerst worden de richtlijnen beschreven voor de richtlijnen bij de aanleg van stadsverwarming of andere energiebronnen, gevolgd door de richtlijnen voor het ontwerp van de meterkast. Tot slot heeft ieder DPW-bedrijf de wettelijke eisen getoetst met de ervaringen van de inspecteurs (§ 7.4).

7.2 Richtlijnen stadsverwarming of andere warmtebronnen

Warmtedistributie, of stadsverwarming, is een verwarmingssysteem, waarbij de woningen worden verwarmd via een ondergronds netwerk van warmwaterleidingen. Als de afstand tussen stadsverwarming en drinkwaterleidingen, zowel transport-, distributie- als aansluitleidingen, te klein is, kan ongewenste opwarming van drinkwater optreden. In stadsverwarmingsbuizen kan de temperatuur van het water namelijk wel 90°C bedragen (Trietsch en Mudde, 1999).

In de Vewin werkbladen zijn richtlijnen opgenomen voor de leidingen in de grond buitenshuis. De afstand tussen een ondergrondse drink- of huishoudwaterleiding en een andere leiding moet – gemeten tussen de buitenzijde c.q. de buitenmantels – tenminste 200 mm zijn. Indien de temperatuur van het buitenoppervlak (inclusief isolatie) van de andere leiding hoger is dan 30°C, dan moet de afstand zodanig worden vergroot, dat de temperatuur van het water in de drink- of huishoudwaterleiding als gevolg van deze andere leiding niet boven de 20°C kan oplopen. Als een waterleidingbedrijf water aanlevert met een temperatuur tussen de 20 en 25°C, wordt dit gezien als een niet beïnvloedbaar gegeven. Als richtwaarde kan per graad Celsius boven de 30°C een afstand van 10 mm worden aangehouden (Vewin, 2004).

In de praktijk worden verschillende richtlijnen aangehouden. Een aantal voorbeelden zijn gevonden:

- a) bij het tracé Diemen-Almere dient de waterleiding minimaal op 1,50 meter van de stadsverwarming aangelegd te worden. Dit geldt voor zowel het primaire als secundaire tracé. De isolatie-eisen zijn aan het nutsbedrijf (Stafleu en Osch, 2011).
- b) in het 'handboek leidingen' van Rotterdam is een legschema voor leidingen opgenomen. Hierin is de verticale positie van een te leggen leiding ten opzichte van de te passeren leiding opgenomen. De

ligging van de stadsverwarming-huisaansluiting, -distributieleiding en -transportleiding ten opzichte van de drinkwaterhuisaansluiting, drinkwaterleiding ≤ 250 mm en de drinkwaterleiding > 250 mm is in dit legschema te vinden. Een stadsverwarming-huisaansluiting ligt bijvoorbeeld onder de huisaansluiting van het drinkwater (Gemeente Rotterdam, 2010). Voor de afstand tussen de leidingen waren geen richtlijnen nodig omdat de stadsverwarming in de weg lag en de drinkwaterleidingen dicht bij de gevel, waardoor de afstand steeds voldoende was (Leidingenbureau, 2011).

- c) In Trietsch en Mudde (1999) worden temperatuursinvloeden op eco- en drinkwater in een betonnen koker geanalyseerd. De toegepaste afstand tussen drinkwater en secundaire stadsverwarming bedraagt in het ontwerp 700 mm en tussen drinkwater en primaire stadsverwarming 1,5 – 1,9 meter. Hiermee wordt voldaan aan de richtlijn genoemd in het Vewin werkblad (Vewin, 2004).

7.3 Richtlijnen meterkast

Ongewenste opwarming van de waterleiding in warme ruimten en door warme leidingen die in de buurt lopen moet worden voorkomen. In dit rapport wordt ingegaan op de eisen en richtlijnen voor de meterkast, waarin de watermeter zich bevindt. Het ontwerp van installaties in de woning of een gebouw om ongewenste opwarming, door bijvoorbeeld vloerverwarming en warmwaterleidingen, te voorkomen is uitvoerig beschreven in een recente ISSO publicatie (ISSO, 2011). Hierin staan bijvoorbeeld richtlijnen voor de afstand tussen waterleidingen en de buitenste vloerverwarmingleiding in de vloer.

In Nederland bestaat ten aanzien van leidingwater de volgende wet- en regelgeving van het ministerie van VROM:

- het Bouwbesluit
- het Drinkwaterbesluit

Volgens het Bouwbesluit en het Drinkwaterbesluit moeten alle installaties voldoen aan de algemene voorschriften voor leidingwaterinstallaties uit NEN 1006. NEN 1006 stelt de volgende eisen:

- a) de temperatuur van het leidingwater in leidingdelen van drinkwater- en huishoudwaterinstallaties mag ten hoogste 25°C bedragen.
- b) het warme water in leidingen die geen onderdeel van een circulatiesysteem zijn, moet in geval er geen water wordt getapt, afkoelen tot een temperatuur gelijk aan of lager dan 25°C.
- c) de afstand van drink-, warmtap- en huishoudwaterleidingen tot leidingen voor verwarming, warmtapwatercirculatieleidingen en andere leidingen moet zo zijn, dat het leidingwater niet onbedoeld kan opwarmen tot boven de 25°C.

Deze algemene voorschriften worden uitgewerkt in de Waterwerkbladen (van Vewin: 1.4G en 3.1) en in NEN 2768, die richtlijnen geeft om hoge temperaturen in de meterruimten te voorkomen.

NEN 2768 geeft normen voor meterruimten. In 2005 is deze norm vernieuwd en aangevuld met eisen voor verwarming door warmtedistributie. De volgende eisen zijn in NEN 2768:2005 opgenomen om warmteontwikkeling in meterruimte te voorkomen:

installatie

- laag plaatsen van watermeter in de meterkast
- warmtebronnen nabij de meterruimte mogen niet bijdragen tot opwarming van de meterruimte
- de afstand van de warmtebron tot de meterruimte is minimaal 500 mm
- doorvoeren in de vloer van de meterruimte moeten zo worden uitgevoerd dat geen opwarming van de vloer plaatsvindt
- in de meterkast mag de drinkwaterleiding niet als stijgleiding zijn uitgevoerd
- geen verdeler/verzamelaar voor cv in meterkast

isolatie

- isolatie van apparatuur en leidingen moet zodanig zijn dat de warmteafgifte maximaal 100 W bedraagt.
 1. isoleren circulatieleidingen voor stadsverwarming en collectief warm tapwater
 2. isoleren van vloerdoorvoeren in gestapelde bouw

3. isoleren van alle warme leidingen in de meterkast (met uitzondering van uittapleidingen warm tapwater)
 4. isoleren afleversets of na-isoleren huidige sets. Geen toepassing dubbele sets, waarbij warmtewisselaar voor warm tapwater hoog in de kast is geplaatst
 - (5. isoleren van CV-verdeler/verzamelaar in de meterkast als deze niet kan worden verwijderd)
- Warmtapwaterleiding(en) en cv-leidingen mogen niet geïsoleerd zijn (i.v.m. de benodigde opwekking van enige thermische trek).

- De dikte van de isolatie is minimaal 20 mm ($\lambda < 0.035$ W/mK)

ventilatie

- wat betreft ventilatie van de meterruimte: openingen onder en boven in de deur zijn minimaal 0,02 m².
- in de meterkast mogen geen obstakels aanwezig zijn, die verstoring van de luchtstroming veroorzaken, zoals bergplanken.

Voor gestapelde bouw moet aanvullend rekening worden gehouden met de opwarming van het koude water door verticale stijgleidingen van het stadsverwarmingsnet in de schachten. NEN 2768:2005 stelt daarom dat bij gestapelde bouw een koude meterruimte met stijgruimte en een aparte warme meterruimte met stijgruimte aanwezig moet zijn, dus een fysieke scheiding tussen de warmtedistributie en de drinkwaterinstallatie.

Het Bouwbesluit geeft eisen voor de ventilatiecapaciteit van de meterruimte. Volgens NEN 2768:2005 bestaat de vereiste ventilatievoorziening uit een opening van 0,02 m² onder en boven in de deur. Bij gestapelde woningen is deze ventilatiehoeveelheid vaak niet voldoende om te voorkomen dat er te veel warmteontwikkeling in en rond de meterruimte optreedt. Dit geldt voor meterruimten in woningen, maar vooral voor meterruimten grenzend aan gemeenschappelijke verkeersruimten (hallen). Naast verminderd comfort kan dit tot ongewenste opwarming van waterleidingen leiden. Om de warmte af te kunnen voeren is ventilatie met koele lucht het meest effectief. Dit kan door:

- koelen van de schacht
- koelen aangrenzende ruimte

(ISSO, 2011; Scheffer, 2003; Scheffer, 2004; Scheffer, 2007; Smits en ten Hove, 2006; Vewin, 2005; van Wolferen, 2007b).

7.4 Ervaringen bedrijven

De wettelijke eisen worden vervolgens bij ieder bedrijf getoetst met de ervaringen van de inspecteurs:

- komen de wettelijke eisen overeen met de interne regelgeving?
- wat kom je vaak tegen mbt deze wetgeving?

7.4.1 Dunea

Ervaringen van Dunea laten zien dat hogere temperaturen van drinkwater vooral het gevolg zijn van:

- vernieuwde aanlegtechnieken met kunststof leidingen welke in afwerkvloeren zijn weggewerkt. Hierdoor kruisen vaak koudwaterleidingen met verwarmingssystemen of warme oppervlakten (hotspots).
- gezamenlijke schachten c.q. kasten voor koud- en warmwaterleidingen. De NEN 2768 beschrijft een meterkast waarin zowel de koud- als de warmwatervoorziening is geplaatst.

Het beeld is dat er meer meldingen van *Legionella* zijn in nieuwbouw.

7.4.2 PWN

PWN eist bij nieuwbouw van woningen meterkasten die voldoen aan NEN 2768. Daarmee wordt - ook bij stadsverwarming - bovenmatige opwarming van het geleverde drinkwater voorkomen. Praktisch voordeel bij hoogbouw is daarbij dat drinkwater en warmteleidingen/ units in gescheiden meterkasten zijn ondergebracht en er geen opwarming kan plaatsvinden. Bij de laagbouwwoningen moet ter voorkoming van opwarming voldoende ventilatiecapaciteit in de meterkastdeur worden aangebracht.

Hier wordt bij de oplevering van de woningen op toegezien. In de praktijk blijkt echter soms dat de ventilatie wordt afgeplakt of dat de meterkastdeur wordt vervangen door een “standaard” gesloten deur zonder ventilatie (gewoon te koop bij Gamma en Praxis). In deze meterkast zit namelijk zoveel “trek” dat de bovenzijde van de deur en het plafond (meestal spuitwerk) vuil worden. Bewoners zien de ventilatie als oorzaak en plakken deze af of vervangen de deur, met opwarming van het drinkwater tot gevolg.

In bestaande bouw is opwarming een groter probleem. In laagbouw worden vaak nog oude slecht geïsoleerde warmte-units aangetroffen waarbij de temperatuur in de meterkast kan oplopen tot kritieke waarden. Ook hier blijkt weer dat de ventilatie van de meterruimte soms niet meer aan de huidige eisen voldoet. Bij bestaande hoogbouw zijn de waterleidingen en leidingen van de stadsverwarmingen boven elkaar gelegen in de meterkast. Daar zien we, zeker na een warme zomer, dat het aangeleverde drinkwater in de bovenste appartementen oploopt tot boven de 25°C. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit bijvoorbeeld is aangetroffen in Purmerend. Mogelijk dat het relatief warme water van pompstation Andijk en de opwarming in het distributienet hier ook debet aan zijn.

7.4.3 Waternet

De inspecteurs van Waternet controleren alleen de prioritaire bedrijven t.a.v. *Legionella* en bedrijven met een gevarenklasse. Waternet hanteert in de ontwerprichtlijnen afstanden t.a.v. de ondergrond. In het verleden heeft Waternet stijgleidingen in een koker in een flat onderzocht op het opwarmeffect. Hier vond behoorlijk wat opwarming plaats van de koudwaterleiding, omdat de koker erg warm werd.

Daarnaast wordt geconstateerd dat bij het plaatsen van watermeters in bestaande bouw geen sprake is van ideale meterruimtes, en dus opwarming in de meterruimte niet valt uit te sluiten.

8 Samenvatting en discussie

8.1 Inleiding

De verwachting voor de toekomst is dat de wettelijke norm van 25°C voor drinkwater regelmatig zal worden overschreden. In dit project is gekeken naar een aantal oplossingen voor hoge temperaturen in het distributienet binnen de thema's koelen, ontwerpeisen aanpassen en verblijftijd beïnvloeden. De oplossingen kunnen gericht zijn op het voorkomen van ongewenste opwarming van het drinkwater of op het beperken van de nadelige invloed van hoge temperaturen op de kwaliteit van het drinkwater.

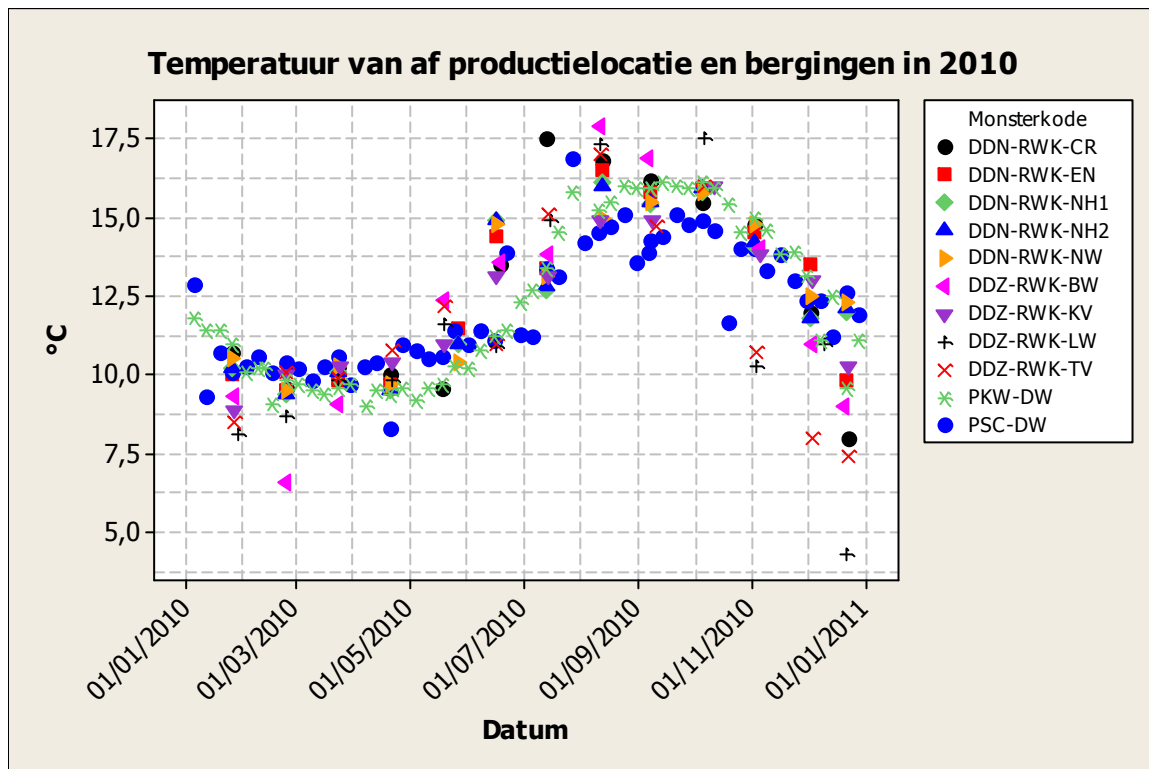
In dit project is voor iedere maatregel gekeken naar het effect ervan op de temperatuur van het drinkwater en op de groei van twee fictieve micro-organismen. In dit hoofdstuk worden de resultaten samengevat en bediscussieerd. Eerst wordt ingegaan op het verloop van de temperatuur van het drinkwater in het gehele net, dus vanaf de bron, via de leidingen naar de tap. Vervolgens wordt ingegaan op het model dat gebruikt is voor de groei van m.o. onder invloed van temperatuur. Tenslotte worden de resultaten van de scenariostudies kort samengevat en in perspectief geplaatst. Daarbij worden de resultaten van de scenario's van het bodemmodel en het watermodel geïntegreerd besproken.

8.2 Temperatuur van bron tot tap

De temperatuur kan veranderen vanaf de bron, in het transportnet, in het distributienet, in de aansluitleidingen en de binneninstallatie. In deze studie is kwantitatief gekeken naar de temperatuur of pompstation, tijdens transport en distributie (§ 8.2.1, 8.2.2). De temperatuuroverdracht in de aansluitleiding wordt in § 8.2.3 kwalitatief beschouwd. De temperatuuroverdracht in de binneninstallatie wordt in principe beperkt door wet- en regelgeving. In deze studie is dit deel van het traject van bron tot tap ook geïnventariseerd (§ 8.2.4).

8.2.1 *Temperatuur vanaf productie en in transportleidingen*

De waterbedrijven hebben goed zicht op de uitgaande temperatuur af pompstation. De waterbedrijven hebben minder goed een beeld bij wat er precies gebeurt met de temperatuur in reinwaterkelders of in lange transportleidingen. Figuur 8-1 toont de temperatuur over het jaar van de productielocaties en reinwaterkelders van Dunea. De figuur laat zien dat de temperatuur op de productielocaties minder varieert dan de temperatuur van de reinwaterbergingen. De bergingen hebben wat hogere temperaturen in de zomer en het najaar, en wat lagere temperaturen in de winter en het voorjaar dan de productielocaties.



Figuur 8-1. Temperatuur af productielocatie Katwijk (PKW-DW) en Scheveningen (PSC-DW), en de reinwaterbergingen (DDN staat voor berging in de regio noord (Katwijk) en DDZ voor zuid (Scheveningen)). Aantal metingen is 52 voor productielocaties en 13 voor de reinwaterbergingen.

Om gevoel te krijgen voor de invloed van transportleidingen op de temperatuur van het drinkwater wordt een rekenvoorbeeldje voor een transportleiding van Andijk naar Hoorn gegeven. Pompstation Andijk neemt water in uit het IJsselmeer en de uitgaande temperatuur kan in de zomer oplopen tot boven de 22 °C. Vanuit Andijk wordt pompstation Hoorn gevoed via een Ø900 mm leiding met een verblijftijd van ongeveer 5 uur. De totale lengte is ca. 18 km; de gemiddelde snelheid is dan 1,0 m/s. De transportleiding bestaat uit ca. 8,5 km Ø900 mm stalen leiding en uit ca. 9,5 km Ø800 mm GVK leiding in een mantelbuis (Ø1000 mm voorgespannen beton, waarschijnlijk met grondwater in de mantelbuis), de verblijftijd is ca. 2,5 uur in beide leidingen. De transportleiding heeft een dekking van 1,10-1,20 (stalen leiding) en 1,05 m (betonnen mantelbuis) en ligt daarmee dieper dan de distributieleidingen.

De opwarmtijd van 15 naar 25 °C in een leiding met een stroomsnelheid van 1,0 m/s en verschillende diameters en warmtegeleidingscoëfficiënt λ (zie § 3.6) kan worden berekend:

- Ø900 mm, $\lambda = 8,9$ W/m.K (gecementeerde stalen leiding): 15 uur.
- Ø800 mm, $\lambda = 1,7$ W/m.K (betonnen leiding): 2 dagen.
- Ø800 mm, $\lambda = 0,43$ W/m.K (GVK): 9 dagen.

De temperatuur van de bodem beïnvloedt de temperatuur in de stalen leiding enigszins. De verblijftijd van 2,5 uur in de stalen leiding is korter dan de opwarmtijd van 15 uur, maar er vindt wel enige warmte-uitwisseling plaats. Gunstig is dat deze leiding dieper ligt, zodat niet de temperatuur van 1,0 m diepte van invloed is, maar de (in de zomer) lagere temperatuur op 1,2 m diepte. In de volgende 2,5 uur in de GVK-leiding vindt er verder nauwelijks warmte-uitwisseling plaats met de bodem, omdat de betonnen buis en vooral de GVK-leiding warmte-isolerend zijn.

Het koelen af pompstation Andijk kan dus zinvol zijn omdat in de transportleiding nauwelijks opwarming plaatsvindt. Door in de zomer het water af pompstation Andijk te koelen wordt de groei van m.o. geremd en daarmee kan een betere waterkwaliteit worden bereikt. Bij een temperatuur van 25 °C

verdubbelt het aantal m.o. type I in 5 uur; bij 15 °C is er slechts een groei van 23% in 5 uur. De uit het water onttrokken warmte kan eventueel als nuttige energie gebruikt worden.

8.2.2 Temperatuur in het distributienet

De temperatuur in het distributienet wordt grotendeels bepaald door de temperatuur van de bodem. De maatregelen om de temperatuur in het distributienet te beperken worden in de volgende paragrafen besproken.

De invloed van externe warmtebronnen, zoals stadsverwarming, op de temperatuur van het leidingwater wordt beperkt door richtlijnen in de waterwerkbladen. In de praktijk worden ook strengere richtlijnen gehanteerd.

8.2.3 Temperatuur in de aansluitleidingen

De temperatuur in de aansluitleidingen is niet expliciet meegenomen. Aansluitleidingen hebben relatief kleine diameters en liggen wat minder diep dan distributieleidingen, maar de verblijftijd in de aansluitleidingen is over het algemeen kort. 's Nachts is er wel een lange verblijftijd, maar stilstaand water warmt veel trager op. Bovendien verdwijnt het 's nachts opgewarmde water met de eerste toiletspoeling uit de transportleiding. Aangenomen wordt dat de opwarming in de aansluitleiding verwaarloosd kan worden. Voor de nagroei van m.o. kan de extra verblijftijd in de aansluitleiding wel van belang zijn.

8.2.4 Temperatuur in de binneninstallatie

De temperatuur van het drinkwater kan in de woning nog verder toenemen. Er zijn verschillende richtlijnen voor de installatie, isolatie en ventilatie in de meterkast en voor de afstanden tussen drinkwaterleidingen en leidingen voor warm water of vloerverwarming in gebouwen. In de praktijk kan zeker bij bestaande bouw niet altijd gegarandeerd worden dat de richtlijnen zijn nageleefd.

8.3 Groei van m.o. onder invloed van de temperatuur

In dit onderzoek zijn alle variabelen in de temperatuurmodellen onderzocht op hun effect op de temperatuur van het drinkwater en op de groei van m.o. in het drinkwater onder invloed van de temperatuur. Het doel van het huidige onderzoek was niet om een zo goed mogelijk groeimodel van m.o. te gebruiken, maar alleen om de invloed van de temperatuur op die groei in beeld te brengen. Op deze manier wordt niet alleen gekeken naar de temperatuur op het eindpunt, maar wordt de invloed van de temperatuur over het gehele traject tussen pompstation en verbruikspunt meegenomen.

De groeicurven van de m.o. zijn op basis van de literatuur opgesteld, maar representeren geen echte m.o. De groei van m.o. in het drinkwaternet wordt bovendien niet alleen door de temperatuur bepaald, maar ook door m.o. in de biofilm, door de aanwezigheid van nutriënten en door de aanwezigheid van bijvoorbeeld chloor. Het is aan te bevelen om de temperatuurafhankelijkheid van de groeicurven van *Aeromonas* en *Legionella* te onderzoeken.

De biofilm wordt mogelijk niet alleen beïnvloed door de temperatuur van het drinkwater, maar ook door de temperatuur van de leidingwand. In het watermodel is nu alleen gekeken naar de temperatuur van het drinkwater; deze kan afwijken van de wandtemperatuur. Een optie in dit model is ook de lokale wandtemperatuur van alle leidingen mee te nemen. Daarmee kan de invloed van de temperatuur op bijvoorbeeld de biofilm worden gekwantificeerd. Daarvoor moet wel eerst een numeriek model worden opgesteld voor de temperatuurafhankelijke groeicurve van de biofilm.

8.4 Resultaten scenariostudies naar oplossingen voor hoge temperaturen in het leidingnet

8.4.1 Inleiding

De uitkomsten van de scenariostudies worden besproken volgens de oplossingsthema's: koelen, aanpassen ontwerpisen en beïnvloeden van de verblijftijd. Een oplossing kan aangrijpen op het bodemmodel en zo de temperatuur van bodem rond het distributienet beïnvloeden. Een oplossing kan

ook ingrijpen op het watermodel en zo de uiteindelijke temperatuur van het drinkwater en de nagroei van m.o. beïnvloeden. Bij de bespreking van de maatregelen zal daarom steeds het effect van de maatregel op de temperatuur, op de groei van m.o. I, die een optimale groeitemperatuur heeft van 25°C en van m.o. II, die een optimale groeitemperatuur heeft van 37°C, achtereenvolgens worden beschreven.

De resultaten van het bodemmodel worden gepresenteerd als het aantal dagen dat in een gegeven scenario op een gegeven diepte de bodemtemperatuur boven de 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt. Op de y-as is het aantal dagen weergegeven dat een bepaalde temperatuur wordt bereikt. Een voorbeeld is te zien in Figuur 8-8. Voor bijvoorbeeld een albedo van 0,20 kan uit de figuur worden afgelezen dat op 50 cm diepte de temperatuur 8 dagen boven 30°C was, 26 dagen boven 27,5°C, 77 dagen boven 25°C, 112 dagen boven 22,5°C en 140 dagen boven 20°C. Het effect van een verhoogde bodemtemperatuur op de temperatuur van en nagroei in het drinkwater wordt met het watermodel verder gekwantificeerd.

De resultaten van het watermodel worden zodanig gepresenteerd dat de effecten van alle scenario's (globale en lokale) met elkaar vergeleken kunnen worden. Dat betekent dat wordt ingezoomd op de lokale effecten in twee wijken, wijk 1 dichtbij het pompstation (Danswijk) en wijk 2, verder van het pompstation vandaan (Muziekwijk). Alleen de relatieve effecten ten opzichte van de 1^e knoop in de straat worden weergegeven. De absolute effecten ten opzichte van de temperatuur af pompstation zijn in hoofdstuk 4 en 5 ook getoond.

- De temperatuurverhoging op de knopen in de straten waarop is ingezoomd in de Danswijk en de Muziekwijk is in de figuren te zien ten opzichte van knoop '0'. Knoop '0' is de knoop aan het begin van de straat, de 1^e knoop voor de gekoelde leiding, 1^e knoop voor kleinere diameter etc.
- Voor de groei van de m.o. is gekeken naar de groei ten opzichte van de hoeveelheid op de knoop aan het begin van de straat (aantal m.o. op de knopen gedeeld door het aantal m.o. op knoop '0').

Figuur 8-2 laat voor de straat in wijk 1 (a en c) zien wat de temperatuurverhoging over de lengte van de leidingen is: bij het begin van de leiding (0 m) is ΔT 0 °C, na 300 m is ΔT 0,8 °C. Oftewel, na 300 m is de temperatuur van het leidingwater al 0,8 °C opgewarmd. Figuur 8-2 laat hetzelfde zien voor de straat in wijk 2 (b en d).

Figuur 8-3 laat voor de straat in wijk 1 (a en c) zien wat de nagroei is van m.o. I over de lengte van de leidingen is: bij het begin van de leiding (0 m) is m.o. I/m.o.I₀ gelijk aan 1 (per definitie), na 300 m is m.o. I/m.o.I₀ gelijk aan 1,95 in het uitgangsscenario. Oftewel, na 300 m is het aantal m.o. I bijna verdubbeld. In het scenario met een kleinere diameter is de toename veel minder, namelijk slechts 30%. Dit is dus een effectieve maatregel in het beperken van de nagroei. Figuur 8-3 laat iets soortgelijks zien voor de straat in wijk 2 (b en d). Figuur 8-4 laat dit zien voor m.o. II.

8.4.2 Effect van koelen

Het effect van koelen is gekwantificeerd met het watermodel. Het koelen aan de buitenkant van de leidingen wordt in het model meegenomen als het verlagen van de omringende bodemtemperatuur. Er wordt gekeken naar het effect van het koelen op verschillende plaatsen in het leidingnet op de temperatuur van het drinkwater op de verbruiksknopen én naar de toename van de m.o. Daarnaast wordt gekeken in hoeverre maatregelen voor het gehele leidingnet of lokale maatregelen effect hebben.

Lokale versus globale maatregelen

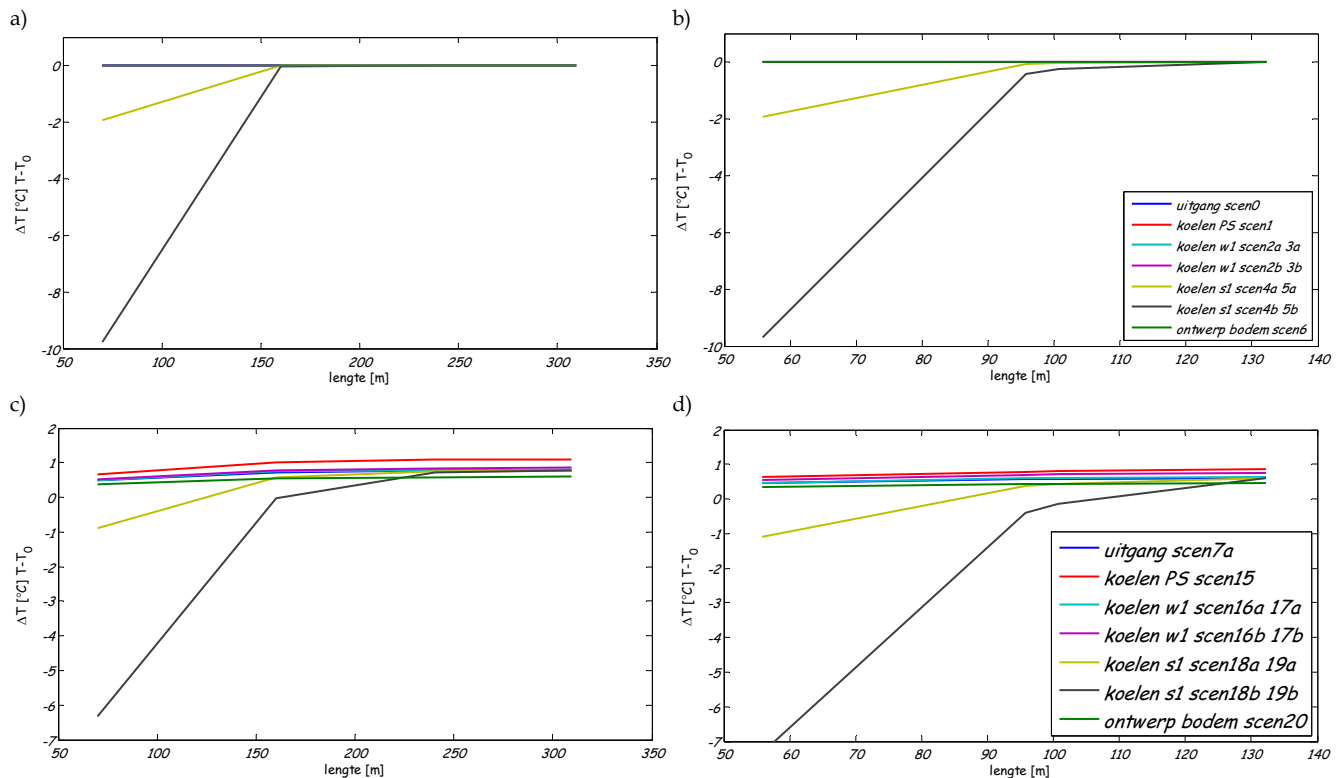
In het watermodel is het verlagen van de bodemtemperatuur berekend in verschillende koelscenario's, zie Tabel 8-1. Om het effect van de verschillende scenario's onderling te kunnen vergelijken zijn de effecten op lokaal niveau in een grafiek uitgezet (voor temperatuur in Figuur 8-2; voor m.o. I in Figuur 8-3; voor m.o. II in Figuur 8-4).

Tabel 8-1 Samenvatting scenario's voor koelen in het watermodel.

scenario #	invulling	leidingnet
1	koelen af pompstation,	GGIJ net
15	uitgaande watertemperatuur 10 °C in plaats van 15 °C	PVC net
2a/3a	lokaal koelen op voedende leiding van wijk 1 en wijk 2,	GGIJ net
16a/17a	bodemtemperatuur 26 °C in plaats van 28 °C	PVC net
2b/3b	lokaal koelen op voedende leiding van wijk 1 en wijk 2,	GGIJ net
16b/17b	bodemtemperatuur 18 °C in plaats van 28 °C	PVC net
4a/5a	lokaal koelen op leiding in straat in wijk 1 en wijk 2,	GGIJ net
18a/19a	bodemtemperatuur 26 °C in plaats van 28 °C	PVC net
4b/5b	lokaal koelen op leiding in straat in wijk 1 en wijk 2,	GGIJ net
18b/19b	bodemtemperatuur 18 °C in plaats van 28 °C	PVC net
6	koelen van gehele leidingnet,	GGIJ net
20	bodemtemperatuur 25 °C in plaats van 28 °C	PVC net

De invloed op de temperatuur in de verschillende scenario's kan als volgt worden samengevat:

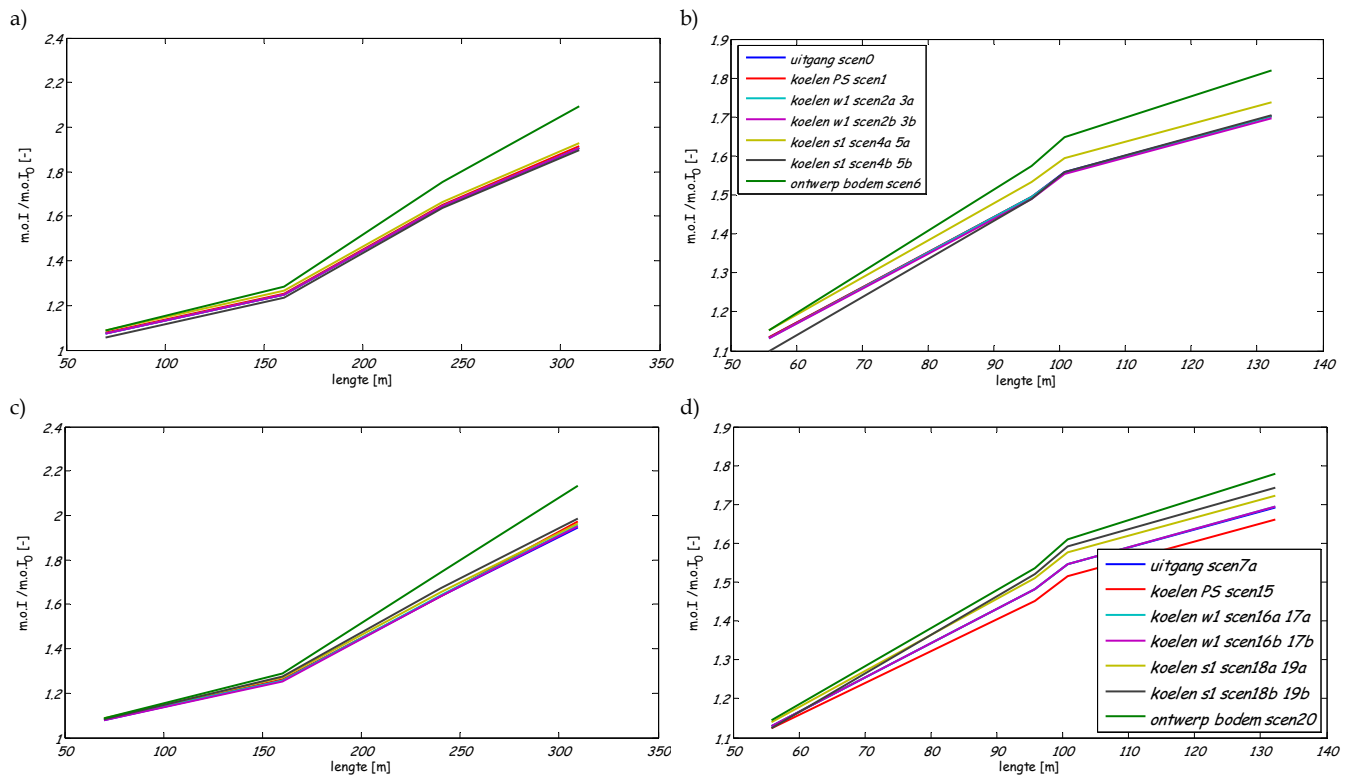
- In een GGIJ-net:
 - de invloed van koelen op de temperatuur is in het GGIJ-net minimaal doordat de temperatuuroverdracht in GGIJ heel snel verloopt. De scenario's met lokaal koelen in de straat laten zien dat alleen de leidingen direct na de gekoelde leiding een lagere temperatuur hebben; na ca. 100 meter is dat effect al weer verdwenen.
- In een PVC-net:
 - In het PVC-net heeft koelen meer invloed. De temperatuuroverdracht in PVC verloopt veel langzamer dan in GGIJ. Hierdoor vindt ook in wijk 2, ver van het pompstation (Figuur 8-2d), nog opwarming over de laatste 100 meter van het leidingnet plaats.
 - Het scenario "koelen af pompstation" (scenario 15) heeft in een PVC-net nog enige invloed. In het scenario waarin gekoeld wordt op het pompstation heeft ca. 7% van de leidingen meer dan 1 °C lagere temperatuur dan in de uitgangssituatie (Figuur 4-5; terwijl gekoeld is met 5 °C). Bij het gebruik van oppervlaktewater, dat in de zomer een hoge temperatuur kan hebben, heeft het koelen af pompstation wel een effect.
 - De invloed op de eindtemperatuur is in het scenario waarin het gehele leidingnet gekoeld wordt het grootst: in het PVC-net (Figuur 5-5) heeft 80% van de leidingen een 3 °C lagere temperatuur dan in de uitgangssituatie.
 - De lokale maatregelen hebben lokaal wel enige invloed, maar dan moet er wel een temperatuurverschil van 10 °C worden aangebracht; een verschil van 2 °C heeft heel weinig effect (Figuur 5-7, Figuur 5-8).



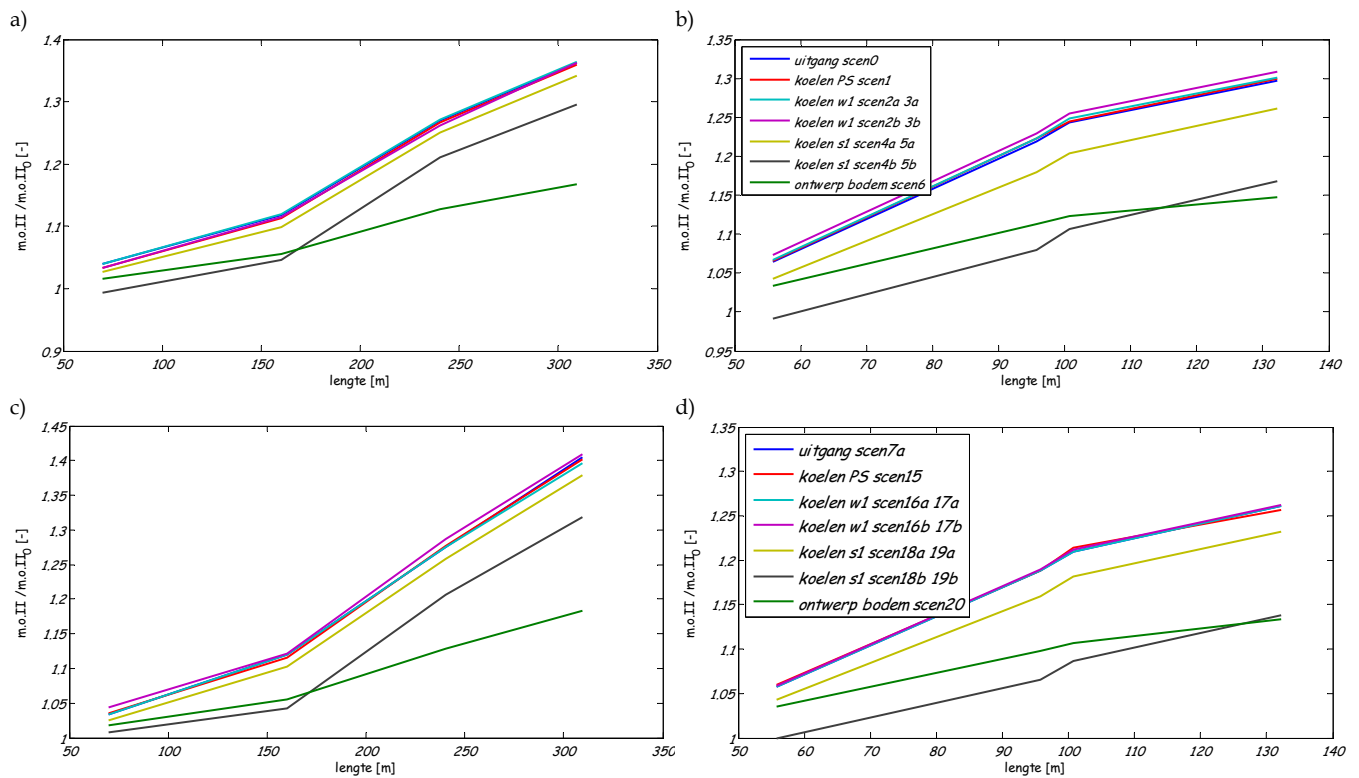
Figuur 8-2. Vergelijking van koelscenario's met criterium verschil in temperatuur op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGIJ-net in de Danswijk; b) GGIJ-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknoppen.

De invloed van de koelscenario's op de nagroei verschilt voor het GGIJ-net en PVC-net, voor de wijken dicht bij en ver van het pompstation en voor m.o. I en m.o. II.

- voor m.o.I, met een optimale groeisnelheid van 25°C:
 - in de wijk dicht bij het pompstation (Figuur 8-3a en c) geldt dat het koelen van het gehele leidingnet leidt tot een verhoging van het aantal m.o.I (dit m.o. groeit immers beter bij 25 °C dan bij 28 °C); de overige maatregelen hebben lokaal allemaal hetzelfde effect, onafhankelijk of het een GGIJ- of PVC-net is.
 - in de wijk ver van het pompstation (Figuur 8-3b en d) geldt dat in een PVC-net het koelen af PS leidt tot een afname van het aantal m.o.I en dus een positief effect heeft. Het (lokale) koelen zorgt daarentegen voor een toename van het aantal m.o.I. Doordat m.o. I beter groeit bij 25 °C dan bij 28 °C leidt het (lokaal) koelen tot een hogere groeisnelheid.
- voor m.o.II, met een optimale groeisnelheid van 37°C:
 - Voor m.o. II geldt in beide wijken en beide leidingmaterialen (Figuur 8-4) dat vooral het verlagen van de bodemtemperatuur in het gehele leidingnet en het lokaal koelen op straatniveau de groei in de laatste 100 meters remt. Op de aantallen m.o. II in het leidingnet heeft het koelen van het gehele leidingnet de meeste invloed (Figuur 5-5, Figuur 5-7, Figuur 5-8). In GGIJ (Figuur 4-5) wordt het aantal m.o. II op 50% van de verbruiksknoppen met 70% of meer verlaagd (fractie 0,3 en groter). In PVC (Figuur 5-5) wordt het aantal m.o. II op 50% van de verbruiksknoppen met 85% of meer verlaagd (fractie 0,15 en groter).



Figuur 8-3. Vergelijking van koelscenario's met criterium ratio van aantal m.o. type I op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGJ-net in de Danswijk; b) GGJ-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknopen.



Figuur 8-4. Vergelijking van koelscenario's met criterium ratio van aantal m.o. type II op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGJ-net in de Danswijk; b) GGJ-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknopen.

Het koelen van het leidingnet, bijvoorbeeld door het verlagen van de bodemtemperatuur rond de drinkwaterleidingen, is dus alleen zinvol als dat voor een groot deel van het leidingnet gebeurt. Lokale maatregelen hebben maar heel beperkte invloed: nauwelijks op de temperatuur, maar wel op de nagroei in de laatste 100 meters.

Het verlagen van de temperatuur af pompstation is alleen zinvol als het lang duurt voordat het drinkwater de bodemtemperatuur aanneemt. Het heeft dus zin in een leidingnet bestaande uit isolerend materiaal, zoals een PVC-leidingnet, maar niet in een GGJ-leidingnet. Bij het gebruik van oppervlaktewater, dat in de zomer een hoge temperatuur kan hebben, heeft het koelen af pompstation zin om de nagroei te verminderen.

8.4.3 Effect van het aanpassen van ontwerpeisen: aanpassen van leidingmateriaal

Door een ander leidingmateriaal te kiezen, kan de snelheid waarmee de warmte van de omringende bodem doordringt naar het drinkwater beïnvloedt worden. Een dikkere leidingwand of leiding van isolerend materiaal zal warmte minder snel doorlaten, waardoor de temperatuur minder snel zal stijgen en daardoor ook de nagroei vertraagd wordt. Er wordt in de scenario's gekeken naar het effect van het isoleren van de waterleidingen en van het verkleinen van de leidingdiameter op de uiteindelijke temperatuur van het drinkwater en de ontwikkeling van beide m.o.

Isoleren van de waterleidingen

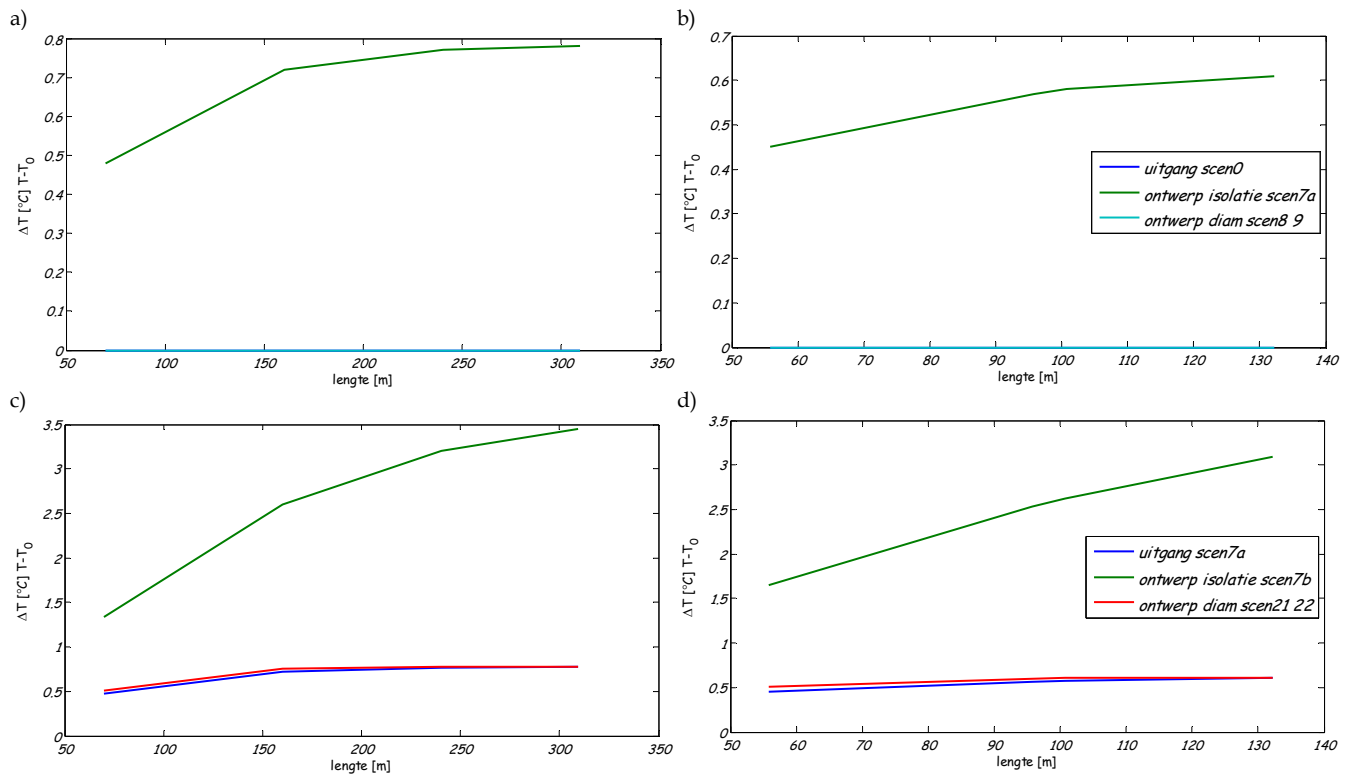
De temperatuuroverdracht van de bodem naar het drinkwater kan worden vertraagd door een isolerend leidingmateriaal te gebruiken. In dit scenario is gerekend met een normale drukklasse van PVC van PN6 en een grote drukklasse van PN12,5 – PN16 voor dikwandig PVC.

Een PVC-net heeft een lagere temperatuur in het leidingnet en lagere nagroei dan een GGJ-net; een net van dikwandige PVC-leidingen heeft een nog lagere temperatuur en nagroei (Figuur 4-5, Figuur 5-5). Het isoleren van leidingen heeft dus zowel een groot effect op de uiteindelijke drinkwatertemperatuur als op de nagroei van micro-organismen met variërende optimale groeitemperaturen en is hierdoor een zeer effectieve maatregel voor zowel het beperken van de temperatuur (Figuur 8-5) als de nagroei van m.o. I (Figuur 8-6) en m.o. II (Figuur 8-7).

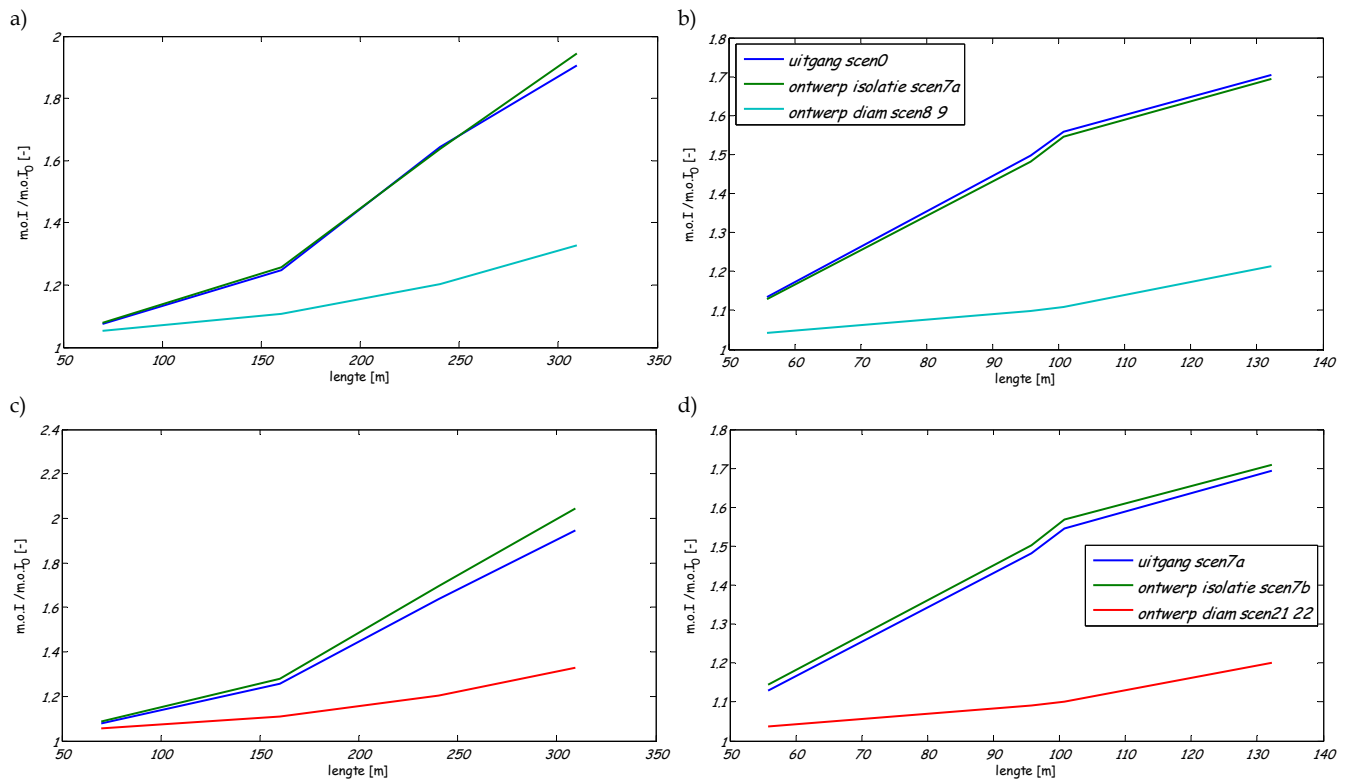
Het leidingmateriaal in het gehele leidingnet moet worden meegenomen in de overweging om het leidingmateriaal aan te passen. Wanneer in het voortraject al zodanig veel warmte-uitwisseling heeft plaatsgevonden met de bodem, is het nauwelijks zinvol om het laatste stuk een sterke isolatie aan te brengen.

Leggen van kleinere diameters

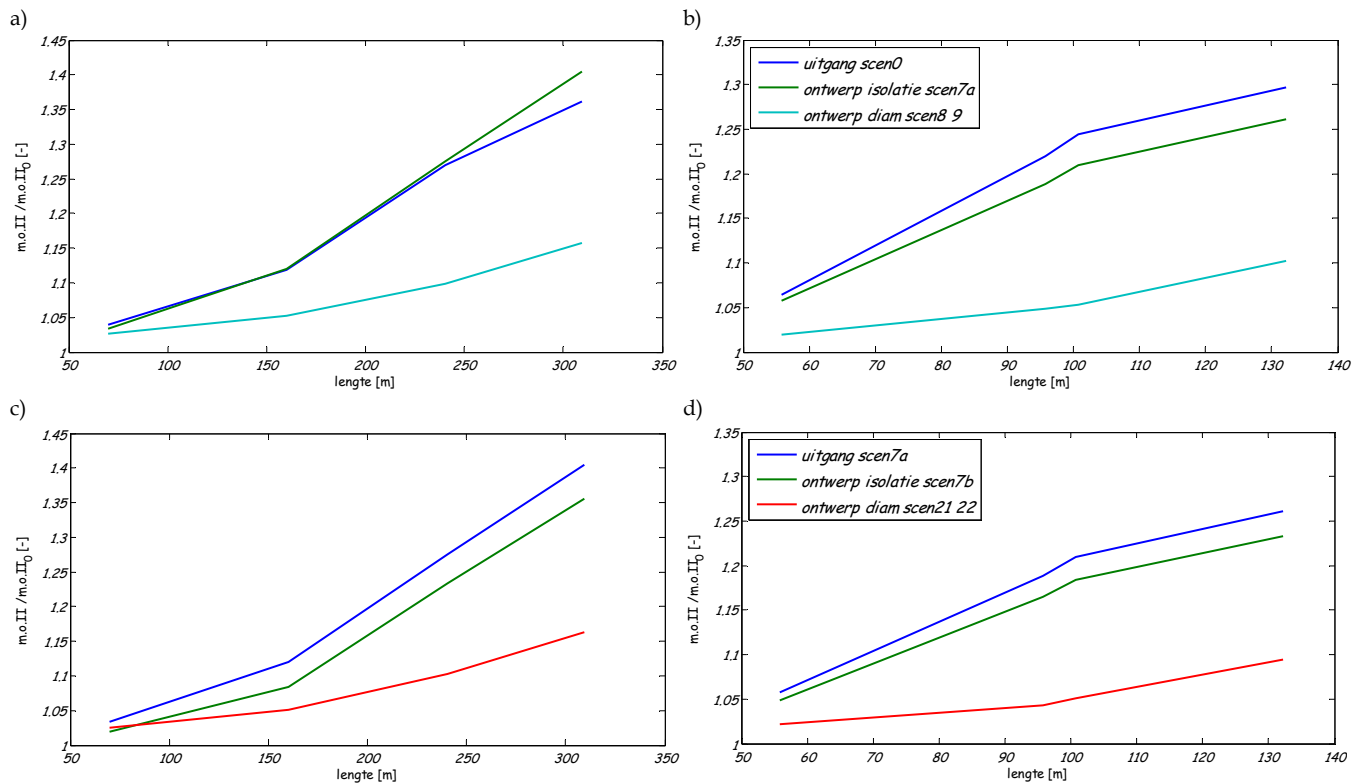
De diameter heeft geen effect op de temperatuur. Bij een gelijkblijvend verbruik zal een kleinere diameter leiden tot een kortere verblijftijd en tot een snellere temperatuuroverdracht. Beide grootheden nemen evenredig (met het kwadraat van de diameter) af en het nettoresultaat is dat de temperatuur niet beïnvloed wordt door de diameter (Figuur 8-5). Doordat de verblijftijd afneemt, neemt echter ook de duur van de nagroei van de m.o. af; dit heeft een groot effect op de aantallen m.o. op de verbruiksknoppen (Figuur 8-6, Figuur 8-7). Het effect is nog veel groter dan de leidingisolatie. Het leggen van PVC-leidingen met kleine diameters, zoals in zelfreinigende netten, is dus ook goed voor het beperken van de temperatuurgerelateerde nagroei in het leidingnet.



Figuur 8-5. Vergelijking van ontwerpscenario's met criterium verschil in temperatuur op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGI-net in de Danswijk; b) GGI-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknopen.



Figuur 8-6. Vergelijking van ontwerpscenario's met criterium ratio van aantal m.o. type I op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGI-net in de Danswijk; b) GGI-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknopen.



Figuur 8-7. Vergelijking van ontwerpscenario's met criterium ratio van aantal m.o. type II op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGIJ-net in de Danswijk; b) GGIJ-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknopen.

8.4.4 Effect van het aanpassen van ontwerpseisen: aanpassen van aanleg van leidingnet

Naast effectief koelen van de leiding kunnen ook maatregelen genomen worden die ervoor zorgen dat de grond rond de leiding minder opwarmt. Het verlagen van de bodemtemperatuur rond de leidingen heeft dan eenzelfde effect op de uiteindelijke watertemperatuur en microbiële groei als koelen (zoals beschreven in paragraaf 8.4.2).

Het effect van verschillende maatregelen op het verlagen van de bodemtemperatuur is gekwantificeerd met het bodemmodel. Daarbij is gekeken naar het aantal dagen in 2050 dat de bodemtemperatuur rond de waterleidingen de 25 °C overstijgt. De invloed van diepteligging, bodembedekking en bodemsoort wordt achtereenvolgens toegelicht.

Aanpassen diepteligging

De drinkwaterbedrijven weten van de meeste leidingen niet hoe diep ze liggen. Aangenomen wordt dat de meeste distributieleidingen op ca. 1,0 m diep liggen (Pieterse-Quirijns e.a., 2011). De bodemtemperatuur rond de drinkwaterleiding is een stuk lager wanneer de leiding dieper wordt gelegd; zie ook Pieterse e.a. 2011. Een diepteligging van 1,25 m is al zeer effectief in het verlagen van de temperatuur rond de leidingen. Afhankelijk van de grondsoort leidt dit tot een reductie van 4-8% in de maximale bodemtemperatuur ten opzichte van een diepteligging van 1 meter en een reductie van 34-100% in het aantal dagen dat de temperatuur dan boven 25°C komt.

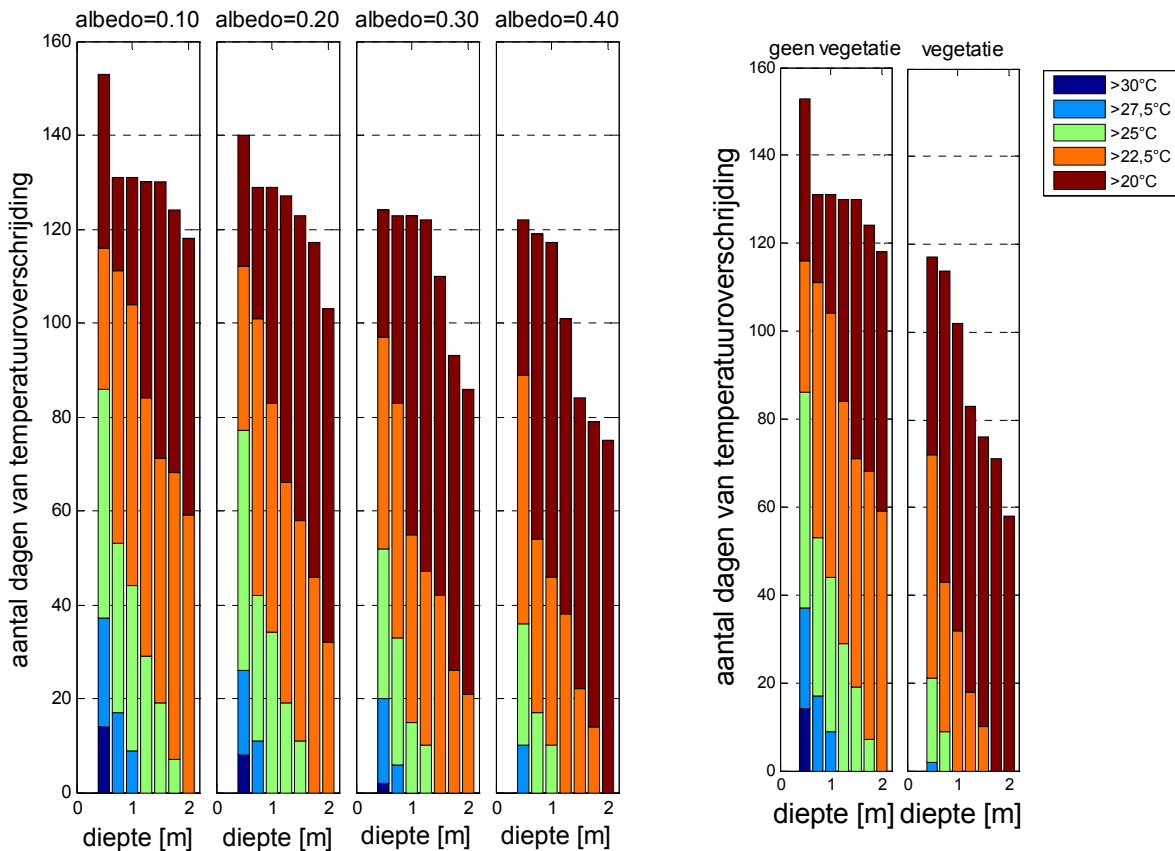
Aanpassen bodembedekking

De bodembedekking bepaalt hoeveel warmte naar de bodem wordt overgedragen, door het reflecteren en absorberen van het zonlicht, afhankelijk van de albedo en door het gebruiken van energie voor het

verdampen van water door vegetatie. Zowel de albedo als de aanwezigheid van vegetatie zijn onderzocht.

De albedo van de bodembedekking bepaalt de mate van terugkaatsing van straling. Zwart asfalt wordt hierdoor warmer dan rode stenen. De grootte van de albedo kan gevarieerd worden door een ander type oppervlak te kiezen. Uit de scenariostudies blijkt dat de albedo de warmteoverdracht naar de bodem vooral beïnvloedt bij hoge waarden (> 0,5) die niet praktisch realiseerbaar zijn. Op een diepte van 1 m bij een albedo van 0,4 of lager zijn er nog altijd dagen waarop de bodemtemperatuur boven de 25 °C komt (Figuur 8-8). In de praktijk beïnvloedt de albedo de bodemtemperatuur dus niet voldoende.

Vegetatie zorgt door verdamping dat minder warmte in de bodem dringt. Dit is een zeer effectieve maatregel (Figuur 8-9).

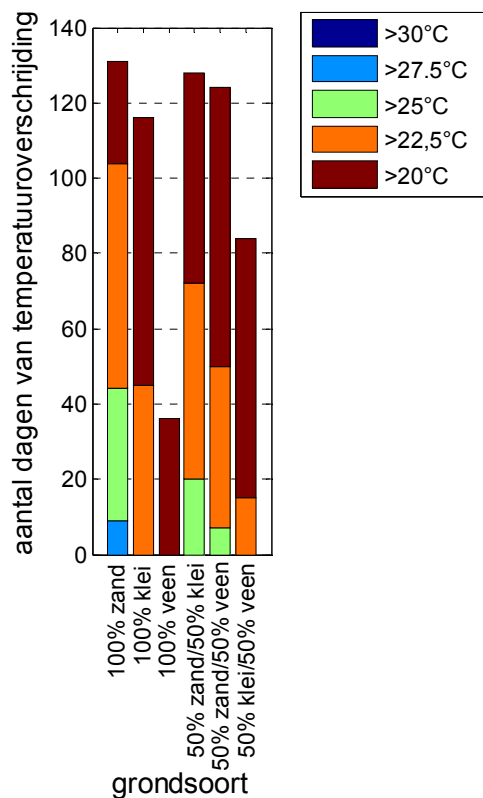


Figuur 8-8 Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt bij verschillende waarden voor de albedo. De uitgangssituatie (albedo = 0,13) komt overeen met albedo 0,10.

Figuur 8-9 Het aantal dagen dat de bodemtemperatuur op elke diepte boven 20°C, 22,5°C, 25°C, 27,5°C en 30°C komt wanneer geen vegetatie aanwezig is (uitgangssituatie) en wanneer het oppervlak begroeid is.

Aanpassen grondsoort

De warmteoverdracht naar de bodem is afhankelijk van de grondsoort. Op 1 m diepte zal in de worst case situatie van 2050 gedurende een aantal dagen de grens van 25 °C worden overschreden in zandige bodems (Figuur 8-10), ook als dat 50% zand en 50% klei of veen is. In klei- en veenbodems wordt de 25 °C niet overschreden op 1 m diepte. Hogere grondwaterstanden, waarbij de zandbodems vochtig zijn, zorgen ook voor vertraging van de opwarming van de bodem.



Figuur 8-10. Aantal dagen per jaar (in het worst case scenario van 2050) dat temperatuur wordt overschreden op 1 m diepte in verschillende grondsoorten.

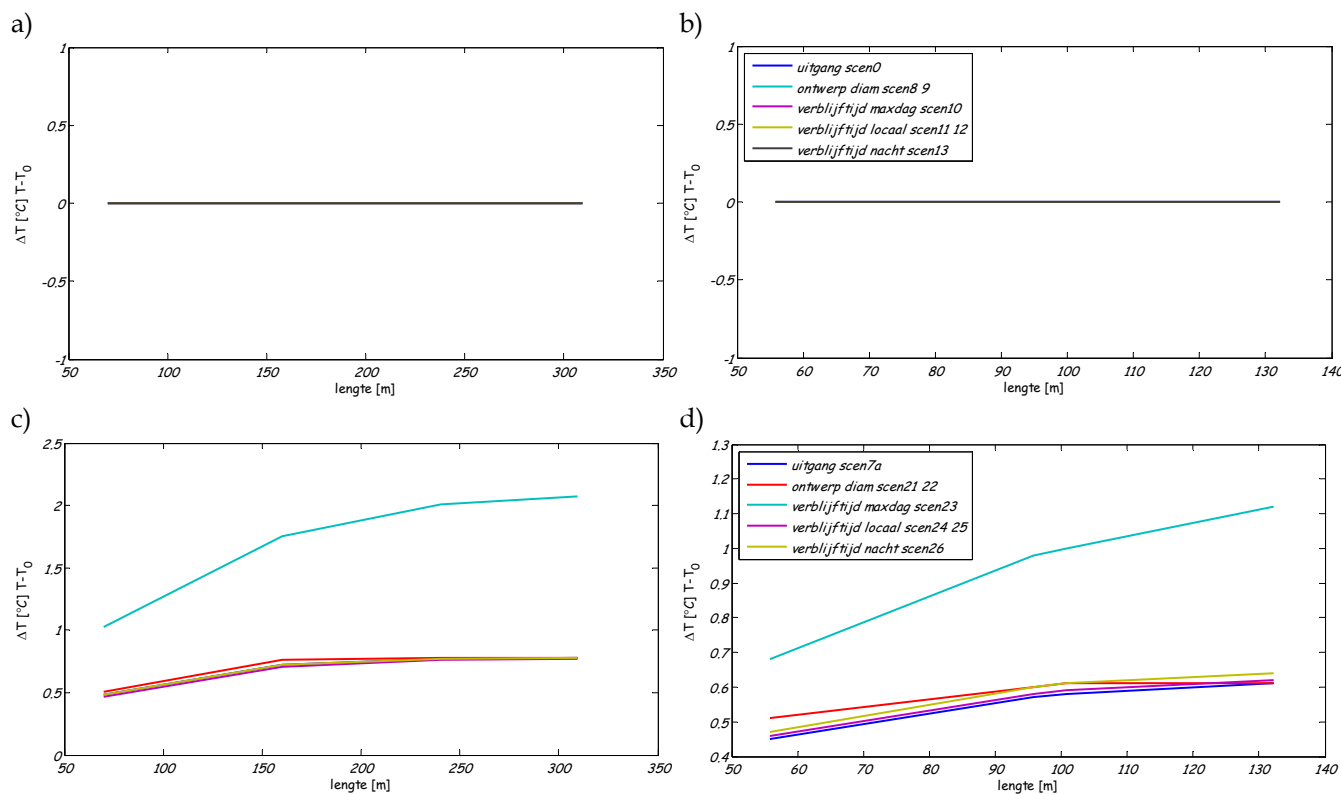
8.4.5 Beïnvloeden van de verblijftijd: genereren van extra verbruik

Het genereren van extra verbruik beïnvloedt de verblijftijd van het drinkwater in het leidingnet. De doorgerekende scenario's zijn 1) een situatie zoals op een max dag, met meer verbruik over de gehele dag en een iets ander verbruikspatroon over de dag; 2) extra verbruik in de nacht (5% op dagbasis) en 3) lokaal extra verbruik op het standaard verbruik. Ook het verkleinen van de diameter heeft invloed op de verblijftijd. De scenario's met lokaal extra verbruik en extra verbruik in de nacht hebben een zeer beperkt effect (Figuur 8-2, Figuur 8-3 en Figuur 8-4). Dit betekent dat niet nagedacht hoeft te worden over hoe extra verbruik kan worden gerealiseerd.

Het scenario met het verbruik van een max dag heeft wel effect. Hiermee kunnen de temperatuur en de nagroei worden beïnvloed.

De invloed op de temperatuur bij het toepassen van een max dag verbruik om de verblijftijd te verlagen:

- In een GGJ-net wordt de temperatuur niet beïnvloed.
- In een PVC-net wordt de temperatuur matig beïnvloed.

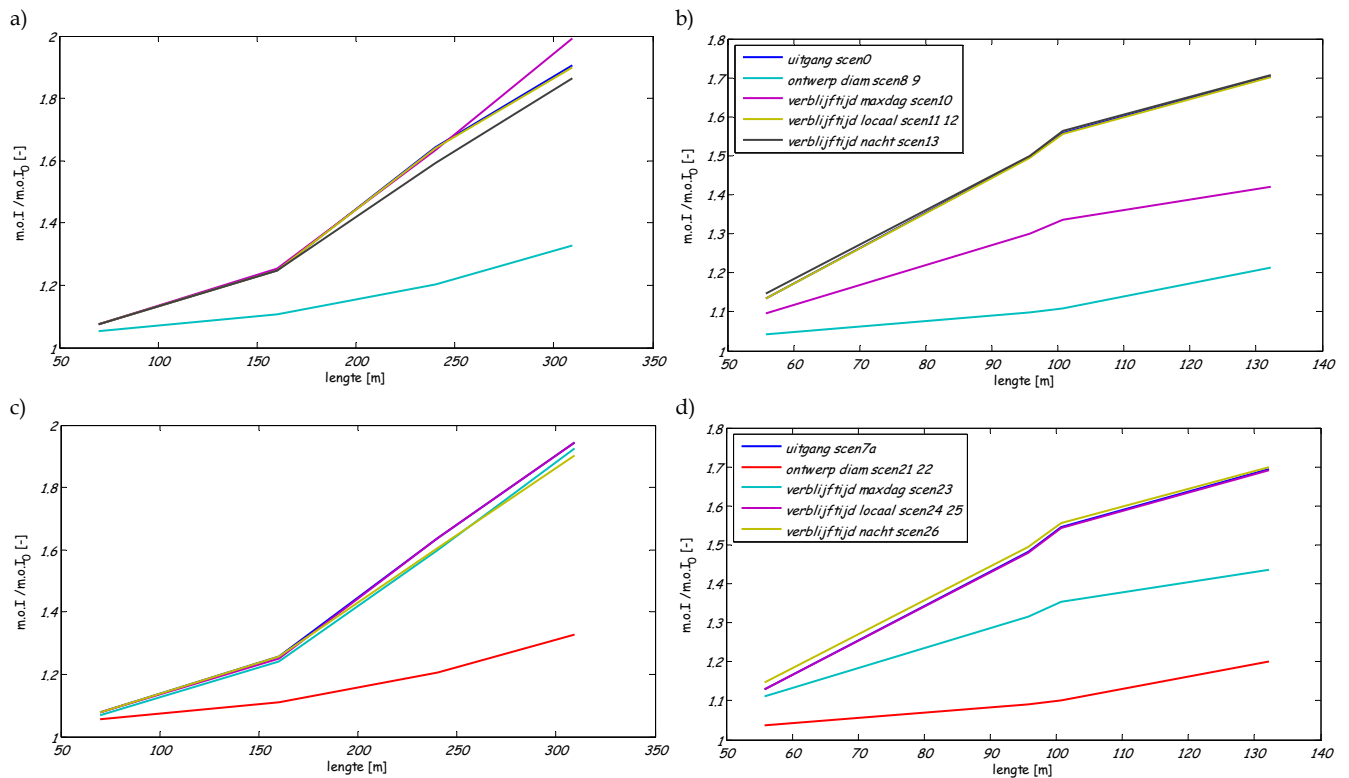


Figuur 8-11. Vergelijking van verblijftijdscenario's met criterium verschil in temperatuur op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGIJ-net in de Danswijk; b) GGIJ-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknoppen.

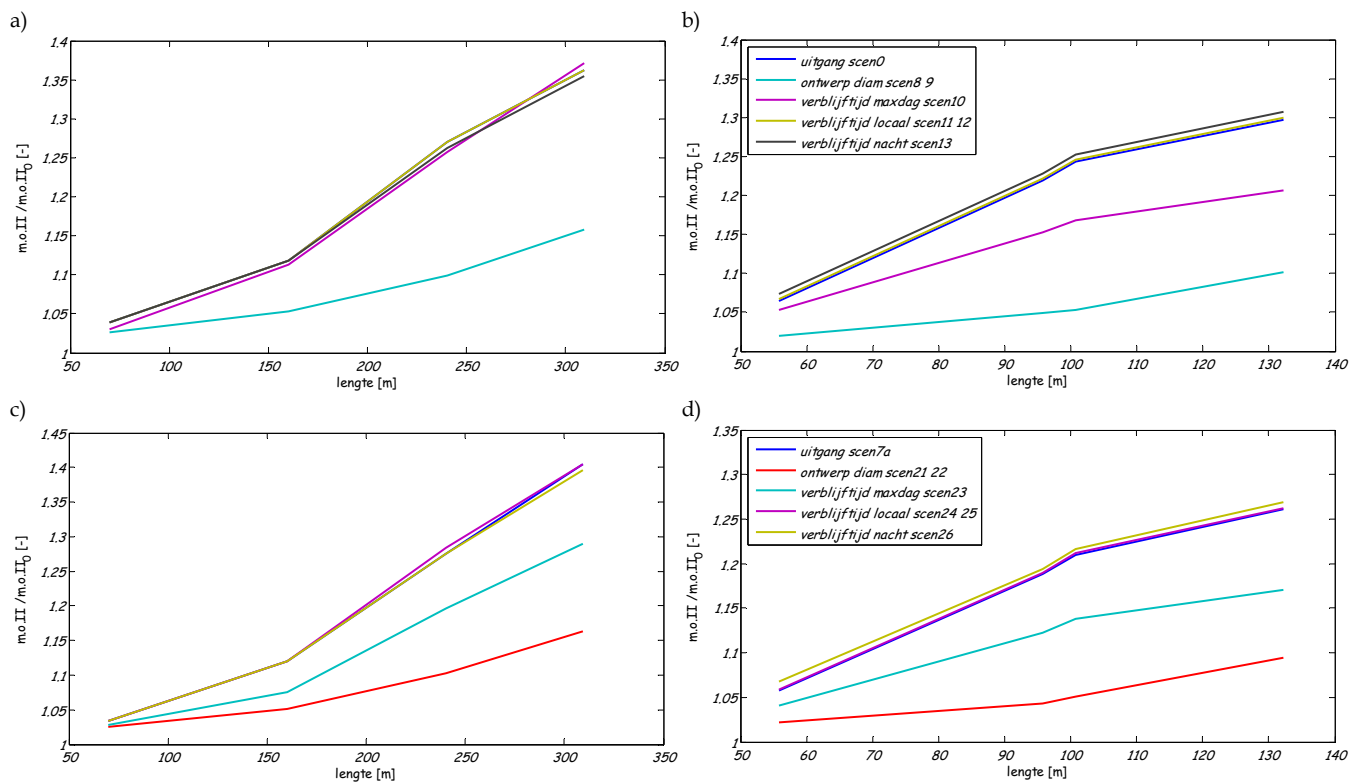
De invloed op de nagroeï bij het toepassen van een max dag verbruik om de verblijftijd te verlagen:

- In het GGIJ-net wordt de nagroeï alleen beperkt in het net ver van het pompstation af; in het GGIJ-net is het effect op de nagroeï minder dan het effect van de kleinere diameter, maar meer dan het effect van overgang naar PVC;
- In het PVC-net wordt de nagroeï beperkt in het net dicht bij en ver van het pompstation af, behalve voor specifiek m.o. I in het net dicht bij het pompstation. In het PVC-net is het effect op de nagroeï minder dan het effect van de kleinere diameter, maar meer dan het effect van koelen en isolatie met behulp van dikwandig PVC.

Een dag van maximaal verbruik vindt over het algemeen plaats in de zomer, maar niet per definitie op de warmste dagen. Het verbruik wordt namelijk kleiner wanneer veel mensen met vakantie zijn. Het is dus niet zo dat het effect op temperatuurgerelateerde nagroeï automatisch wordt gecompenseerd door hoger verbruik.



Figuur 8-12. Vergelijking van verblijftijdscenario's met criterium ratio van aantal m.o. type I op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGI-net in de Danswijk; b) GGI-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknoppen.



Figuur 8-13. Vergelijking van verblijftijdscenario's met criterium ratio van aantal m.o. type II op knoop '0' op tijdstip 0:00 en de knopen in de straat a) GGI-net in de Danswijk; b) GGI-net in de Muziekwijk; c) PVC-net in de Danswijk; d) PVC-net in de Muziekwijk. Analyse op 4 verbruiksknoppen.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Algemeen

In dit project is gekeken naar een aantal oplossingen voor hoge temperaturen in het distributienet binnen de thema's koelen, ontwerpeisen aanpassen en verblijftijd beïnvloeden. De oplossingen worden onderzocht op hun effect op de temperatuur van het drinkwater en op de groei van m.o. in het drinkwater onder invloed van de temperatuur bij de aanwezigheid van voldoende substraat. De conclusies op basis van deze twee criteria verschillen en worden apart benoemd.

9.2 Verlagen van de drinkwatertemperatuur

De temperatuur van het drinkwater kan worden verlaagd, in volgorde van grootste bijdrage, door

1. De bodem te koelen, in het hele net, maar ook lokaal koelen kan lokaal nut hebben. De bodemtemperatuur (ter plekke van de leidingen) kan worden beperkt door:
 - a. vegetatie aan te brengen langs het tracé;
 - b. de leidingen dieper te leggen;
 - c. door zand te vermijden.
2. Isolerende leidingmaterialen te kiezen (PVC, eventueel met grotere wanddikte).
3. Verblijftijd te verkorten (max dag). Dit heeft een beperkte invloed, en alleen in PVC.

De leidingdiameter heeft geen invloed op de temperatuur. Het koelen af pompstation heeft effectief geen invloed op de temperatuur aan de tap.

9.3 Beperken van de nagroei van m.o.

De nagroei van de virtuele m.o. I en II in het drinkwater kan worden beperkt, in volgorde van grootste bijdrage, door

1. De verblijftijd te verkorten door de diameter verkleinen.
2. De verblijftijd te verkorten door extra verbruik te genereren (10% over de gehele dag is vele malen effectiever dan 5% extra dagverbruik in de nacht of lokaal 15-30% extra verbruik).
3. Het ingaande water te koelen af pompstation, dit is afhankelijk van de temperatuur, de groeicurve en temperatuurafhankelijkheid van het m.o. en de isolatie (heeft alleen nut in PVC-net, niet in GGII).
4. In het hele net de bodem te koelen (zie § 9.2); lokaal koelen heeft zeer beperkt effect.

Zelfreinigende netten met kleine diameters zijn dus ook gunstig in het beperken van de nagroei van m.o.

9.4 Praktische aanbevelingen: maatregelen in de praktijk

In dit onderzoek zijn alle variabelen in de temperatuurmodellen onderzocht op hun effect op de temperatuur van het drinkwater en op de groei van m.o. in het drinkwater onder invloed van de temperatuur. Ook is een en ander gezegd over hoe de parameters in de werkelijkheid zijn te bereiken. Niet alle maatregelen zijn even goed in praktijk te brengen. Hier beperken we ons tot de meest praktische aanbevelingen.

- In de ontwerpfase kan gekozen worden voor kleine leidingdiameters, een meer warmte-isolerend leidingmateriaal (dikwandig PVC) en een structuur met beperkte verblijftijden (bijvoorbeeld een vertakt leidingnet). Het zelfreinigende leidingnet is dus ook gunstig met betrekking tot de gevolgen van hogere temperaturen.
- In de aanlegfase kan gekozen worden om leidingen dieper te leggen of bij voorkeur onder vegetatie.
- In de beheerfase kan het drinkwater af pompstation worden gekoeld. Hiermee kan thermische energie worden gewonnen en kan wanneer het leidingnet voornamelijk uit PVC bestaat de opwarming van het drinkwater in het leidingnet en de nagroei door opwarming worden vertraagd. Dit geeft in de zomer, wanneer het oppervlaktewater warm is, een verbetering van de waterkwaliteit. Het effect op de temperatuur van het tapwater bij de consumenten is beperkt,

zodat de extra benodigde energie (en dus de kosten) voor het opwarmen van het tapwater beperkt blijft (Blokker e.a. 2011). De temperatuurafhankelijke nagroei kan worden beperkt in geval van een lange verblijftijd in grote transportleidingen en een distributienet van PVC.

- In de beheerfase kan door middel van afsluiters de verblijftijd mogelijk ook worden beperkt. Het verkorten van de verblijftijd door extra verbruik vergt immers veel extra verbruik voordat dit effect heeft. Lokaal koelen heeft alleen lokaal effect op de temperatuur maar zeer beperkt op de aantallen m.o. Hoe het beste lokaal gekoeld zou moeten worden is dan ook niet verder uitgezocht.
- Leidingen die worden vervangen kunnen opnieuw worden beoordeeld op hun bijdrage aan de waterkwaliteit. Mogelijk moet de terug te leggen leiding een kleinere diameter hebben of op grotere diepte worden gelegd.

9.5 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Diepteligging en temperatuur

De drinkwaterbedrijven weten van de meeste leidingen niet hoe diep ze liggen. De diepteligging is voor slechts een beperkt aantal leidingen geregistreerd. Aangenomen wordt dat de meeste distributieleidingen op ca. 1,0 m diep liggen (Pieterse-Quirijns e.a., 2011). Uit het onderzoek blijkt dat de bodemtemperatuur een zeer grote invloed heeft op de temperatuur van het drinkwater aan de tap. Het is interessant om te onderzoeken of de temperatuur van monsters kan helpen bij het bepalen van de diepteligging van leidingen. Wanneer de temperatuur van reguliere monsters geografisch met elkaar vergeleken worden (bijvoorbeeld alle monsters die in een week genomen zijn) kunnen locaties met afwijkende temperaturen duiden op andere diepteligging; hierbij moet wel rekening worden gehouden met bijvoorbeeld het grondwaterpeil, grondsoort en mogelijke warmtebronnen in de ondergrond. Locaties met in de zomer hogere temperaturen zullen dan mogelijk minder diep liggen dan andere locaties.

Microbiële groei in drinkwater

Om het effect van verschillende maatregelen op de nagroei in het distributienet te onderzoeken, is in dit onderzoek een zeer vereenvoudigd model gebruikt voor de groei van twee fictieve micro-organismen. Voor de m.o. is een groeicurve opgesteld, gebaseerd op de literatuur, waarbij de groei alleen afhankelijk is van de temperatuur. De groei van m.o. in het drinkwaternet wordt echter niet alleen door de temperatuur bepaald, maar ook door m.o. in de biofilm, door de aanwezigheid van nutriënten en door de aanwezigheid van bijvoorbeeld chloor. Het is aan te bevelen om ook de modellering van de groei van m.o. in het distributienet, afhankelijk van temperatuur, biofilm, nutriënten, etc. nader te onderzoeken voor bijvoorbeeld *Aeromonas* en *Legionella*.

Invloed verblijftijd op waterkwaliteit

Afgelopen jaren is in het DPW onderzoek veel aandacht geweest voor het modelleren en meten van de verblijftijd en de invloed van de verblijftijd op de waterkwaliteit. Dit laatste bleek lastig te kwantificeren. In het buitenland is verblijftijd meestal belangrijk om een bepaalde hoeveelheid chloor in het net te kunnen garanderen. Uit dit onderzoek blijkt hoe groot de invloed is van de verblijftijd op de nagroei van sommige m.o. wanneer niet gechloord wordt. Op basis van een reële groeicurve, die afhankelijk is van de temperatuur en van andere factoren zoals beschikbaarheid van nutriënten, kan op basis van een modelstudie mogelijk een maximumwaarde voor de verblijftijd worden gedefinieerd die kan worden gehanteerd bij het ontwerp van nieuwe leidingnetten.

De verblijftijd kan in de ontwerpfase ook worden beperkt door het aantal pendelzones te beperken. In de huidige modelstudie zijn standaardverbruikspatronen toegepast. Daarmee worden de gemiddelde verblijftijden goed gemodelleerd, maar de uitschieters in verblijftijden in bijvoorbeeld de pendelgebieden en de uiteinden van het leidingnet worden daarmee onderschat (Blokker en Beverloo 2009, Blokker 2010). Aanbevolen wordt om de verblijftijd met meer realistische verbruikspatronen, bijvoorbeeld op basis van SIMDEUM, te modelleren om een uitspraak te kunnen doen over maximumwaarden voor verblijftijden.

Stedelijke ontwikkelingen

De temperatuur in de stad kan met name door het ontbreken van veel vegetatie een aantal graden hoger zijn dan op het omliggende platteland; dit is het zogenaamde *Urban Heat Island* effect. Met een verwachte toename van de stedelijkheid in Nederland van 14% in 2000 tot 20% in 2040, is het aannemelijk om te verwachten dat de UHI impact steeds belangrijker wordt (Heusinkveld et al. 2010). In dit project is gekozen voor plattelandsomgeving in de scenario's met het bodemmodel, omdat onvoldoende informatie bekend is om het UHI goed te modelleren. Omdat de meeste aansluitingen in stedelijk gebied liggen is een stedelijke omgeving interessanter voor de waterbedrijven om mee te nemen in de scenariostudies. Daarom wordt aanbevolen om meer informatie over de stedelijke omgeving, zoals de variatie van de hogere temperaturen als gevolg van UHI over de dag en in een seizoen, te achterhalen, zodat de stedelijke gebieden op termijn doorgerekend kunnen worden.

Gemiddeld kan de luchttemperatuur in een stad in Nederland 2,5°C hoger zijn dan die op het omringende niet-stedelijke gebied. Er zijn UHI effecten gemeten van 7-8°C (Pieterse-Quirijns e.a., 2011). Dit leidt tot een ongewenste extra verhoging van de temperatuur (en bijbehorende negatieve beïnvloeding van de waterkwaliteit) van het drinkwater. In nieuwbouwwijken wordt vaak eerst grondverbetering toegepast voordat de woningen worden gebouwd. Dit wordt meestal met zand gedaan. Ook dit heeft een negatief effect op de temperatuur (en bijbehorende waterkwaliteit) van het drinkwater. In nieuwbouwwijken is het daarom aan te raden nog beter te overwegen wat de ideale diepte van drinkwaterleidingen is.

10 Literatuur

Abu-Hamdeh, N.H. (2003). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*, vol. 86, no. 1, p. 97-102.

Blokker, E. J. M. (2010). "Stochastic water demand modelling for a better understanding of hydraulics in water distribution networks," Delft University of Technology.

Blokker, E. J. M., en Beverloo, H. (2009). *Verblijftijden leidingnet Zandvoort; Metingen boulevard Zandvoort zomer 2008*, KWR, Nieuwegein. KWR 09.010 (DPW).

Blokker, E.J.M. en E.J. Pieterse-Quirijns (2010). Model voor de berekening van de watertemperatuur in het leidingnet. *H2O*, vol. 23, p. 46-49.

Blokker, E.J.M. en E.J. Pieterse-Quirijns (2011). Modelling temperature in the drinking water distribution system. *in preparation*.

Blokker, E. J. M., van Osch, A. M., Hogeveen, R., and Mudde, C. (2011). "Thermal energy from drinking water and cost benefit analysis for an entire city." IWW Amsterdam 2011, Amsterdam.

Dukan, S., Y. Levi, P. Piriou, F. Guyon and P. Villon (1996). Dynamic modeling of bacterial growth in drinking water networks. *Water Research*, vol. 30, no. 9, p. 1991-2002.

Gemeente Rotterdam (2010). *Handboek leidingen. Rotterdam – 2010. Nadere regels ter uitvoering van de leidingenverordening Rotterdam en de telecommunicatieverordening Rotterdam*. Rotterdam: Gemeentewerken.

Hoffmann, M.R. (2006). *Publieke samenvatting NEO project Active Building Albedo Management*. BSE-2005 Nieuw Energie Onderzoek (NEO) en SenterNovem.

ISSO (2011). *Integraal ontwerpen van legionellaveilige woningen. Concepten ter voorkoming van ongewenste opwarming van leidingwater in woningen*. ISSO-SBR 811.

KNMI (2009). *Klimaatverandering in Nederland. Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's*. De Bilt: KNMI.
Leidingenbureau (2011). *Persoonlijke communicatie*.

Ochsner, T.E., R. Horton and T. Ren (2001). A new perspective on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 65, p. 1641-1647.

Pieterse-Quirijns, E.J., R. de Groot, Y. de Rijck en K. Ruijg (2011). *Diepteligging van leidingen*. Nieuwegein: KWR. KWR 2011.022.

Rafferty, K. (1998). "Piping geothermal fluids." Chapter 10, *Geothermal direct use engineering and design guidebook*, Geo-Heat Center, Oregon Institute of Technology, Klamath Falls, OR.

Rubulis, J., T. Juhna, L. Henning and A. Korth (2007). *Methodology of modeling bacterial growth in drinking water systems*. Techneau rapport D5.5.4.

Scheffer, W. (2003). Leidingwater te warm door stadsverwarming. *Intech K&S*, november, p. 82-84.

Scheffer, W. (2007). Opwarmen leidingwater in woningen door (stads-)verwarming. *Intech K&S*, oktober, p. 44-47.

Scheffer, W. (2004). Stadsverwarming jaagt de temperatuur leidingwater op. Onderzoek naar *Legionella* in woonwijk Camminghaburen. *Intech K&S*, januari, p. 14-17.

Smits, P. en J.M. ten Hove (2006). Hoge temperaturen in de meterruimte voorkomen. NEN 2768 geeft richtlijnen tegen temperatuurverhoging. *VV+*, maart, p. 194-197.

Stafleu, M.D. en J.M. van Osch (2011). *Persoonlijke communicatie. Medewerkers bij gemeente Almere.*

Trietsch, E.A. en ir. Mudde (1999). *Warmtetransport van water in een betonnen koker. Analyse van temperatuursinvloeden op eco- en drinkwater in een betonnen koker.* Nieuwegein: KWR. KOA 99.046.

van der Molen, M., H. Kooij, E. Smulders en B. Heijmans (2008). *Warmte-indringing in de bodem.* Nieuwegein: KWR. BTO-rapport 2008.053.

van Wolferen, J. (2007a). *Beoordeling Legionellaveiligheid leidingwaterinstallatie Amstelstraat e.o. Utrecht.* Delft: TNO. 2007-A-R0089/B.

van Wolferen, J. (2007b). *Opwarmen leidingwater in woningen t.g.v. stadsverwarming.* TNO rapport: TNO Bouw en Ondergrond. 2007-A-R0691/B.

Vewin (2004). *VEWIN Waterwerkblad. Aanleg van leidingwaterinstallaties. Leidingen in de grond buitenshuis.* WB 3.5.

Vewin (2005). *VEWIN Werkblad Leidingwaterinstallaties: beheer van leidingwaterinstallaties.* WB 1.4G *Meterkasten met warmtelevering.*

Vries, D. (2011). *Toenemende temperaturen van het water: effect op de zuivering en hoe te voorkomen in het distributienet.* Nieuwegein: KWR. KWR 2010.110.

www.knmi.nl: <http://www.knmi.nl/klimaatscenario's/toekomst/index.php> (24/02/2011)

I Modellen voor groeisnelheid micro-organismen als functie van temperatuur

Om binnen de scenario's de invloed van de temperatuur en de tijdsduur op de groei van m.o. te onderzoeken is een model nodig dat de ontwikkeling beschrijft van m.o. bij verschillende temperaturen. De verwachting is dat de groeisnelheid toeneemt vanaf een minimale temperatuur en een maximum bereikt bij de optimale temperatuur, waarna de groeisnelheid weer afneemt. In de literatuur kunnen een aantal modellen gevonden worden.

I.1. Verschillende groeimodellen voor micro-organismen

gamma model

In Van Gerwen and Zwietering (1998) wordt het gamma model beschreven om de afhankelijkheid van de groeisnelheid van verschillende factoren, zoals temperatuur, pH en a_w uit te drukken:

$$\mu = \mu_{opt} \cdot \gamma(T) \cdot \gamma(pH) \cdot \gamma(a_w)$$

waarin:

$$\gamma(T) = \left(\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right)^2$$

$$\gamma(pH) = \frac{(pH - pH_{min}) \cdot (pH_{max} - pH)}{(pH_{opt} - pH_{min}) \cdot (pH_{max} - pH_{opt})}$$

$$\gamma(a_w) = \frac{a_w - a_{w,min}}{1 - a_{w,min}}$$

Met de aanname dat $pH = pH_{opt}$ en $a_w = 1$:

$$\gamma(pH) = 1$$

$$\gamma(a_w) = 1$$

$$\mu = \mu_{opt} \cdot \left(\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right)^2$$

Met een optimale groeisnelheid van $\mu_{opt} = 1 \cdot 10^{-6} [s^{-1}]$, een minimale temperatuur van $T_{min} = 15^\circ C$ en een optimale groeitemperatuur van $T_{opt} = 35^\circ C$ wordt de groeicurve verkregen, zoals te zien is in Figuur I-1. Uit de figuur blijkt dat bij temperaturen boven de optimale temperatuur de groeisnelheid blijft toenemen met de temperatuur en ook bij temperaturen beneden de minimale temperatuur neemt de groeisnelheid toe. Dit komt niet overeen met de verwachte groeisnelheid van de bacteriën bij variërende temperatuur. In het gamma model wordt uitgegaan van worst-case benadering. Er zit geen maximale groei temperatuur is. Dit betekent dat het micro-organisme alsmaar doorgroeit. Voor het temperatuurgebied dat betrekking heeft op het distributienet (rond 25 graden) maakt dit niet veel uit. Wanneer interesse bestaat voor het gedrag rond de maximale temperatuur (meestal rond 40-45 graden), dan is een model nodig waarin T_{max} is verwerkt.

parabolische functie als model

De verwachting is dat de groeisnelheid toeneemt vanaf de minimale temperatuur en een maximum bereikt bij de optimale temperatuur, waarna de groeisnelheid weer afneemt. Een parabolische functie kan dit verloop beschrijven:

$$\mu = \mu_{opt} \cdot \left(1 - \frac{(T - T_{opt})^2}{(T_{min} - T_{opt})^2} \right)$$

De bijbehorende afhankelijkheid van de groeisnelheid van de temperatuur is ook in Figuur I-1 te zien.

Gaussian model

Een Gaussian distribution is ook mogelijk voor het beschrijven van de verwachte trend van de groeisnelheid met de temperatuur. De Gaussian vergelijking ziet er als volgt uit:

$$f(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$$

Voor het beschrijven van de groei van een micro-organisme kan deze herschreven worden naar:

$$\mu = \mu_{opt} \cdot e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{c(T_{min}-T_{opt})^2}}$$

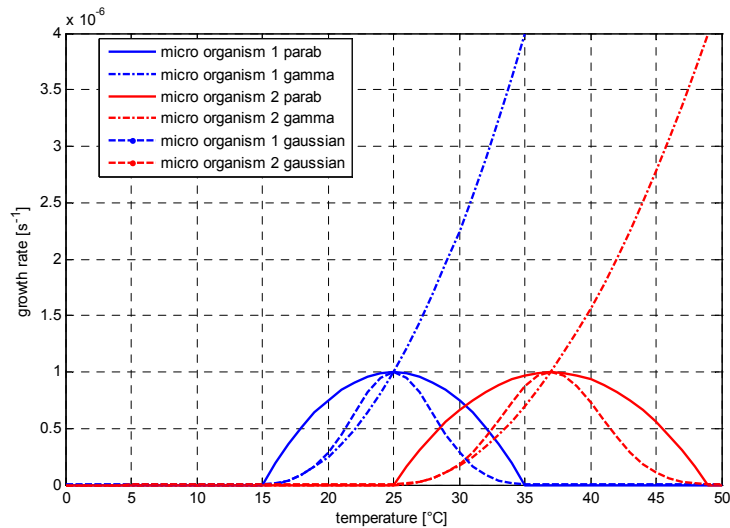
Hierin is voor c de factor 0,2 gekozen, zodat de groei van de m.o. bij de minimale temperatuur T_{min} begint:

$$\mu = \mu_{opt} \cdot e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{0.2 \cdot (T_{min}-T_{opt})^2}}$$

In Dukan et al. (1996) wordt soortgelijke relatie gebruikt voor de maximum groeisnelheid.

In Figuur I-1 zijn de groeisnelheden bij toenemende temperatuur te zien van twee micro organismen bij het gebruik van de drie relaties. Micro organisme 1 heeft een minimum temperatuur van 15°C en een optimale temperatuur van 25°C. Micro organisme 2 heeft een minimum temperatuur van 25°C en een optimale temperatuur van 37°C.

Uit de figuur blijkt dat de Gaussianse weergave van de temperatuurafhankelijkheid het meest overeenkomt met het gammamodel voor de temperatuurafhankelijkheid tot aan de optimale temperatuur.



Figuur I-1 De groeisnelheid als functie van de temperatuur volgens het gamma model, een parabolische functie en een Gaussian model voor twee verschillende micro organismen.

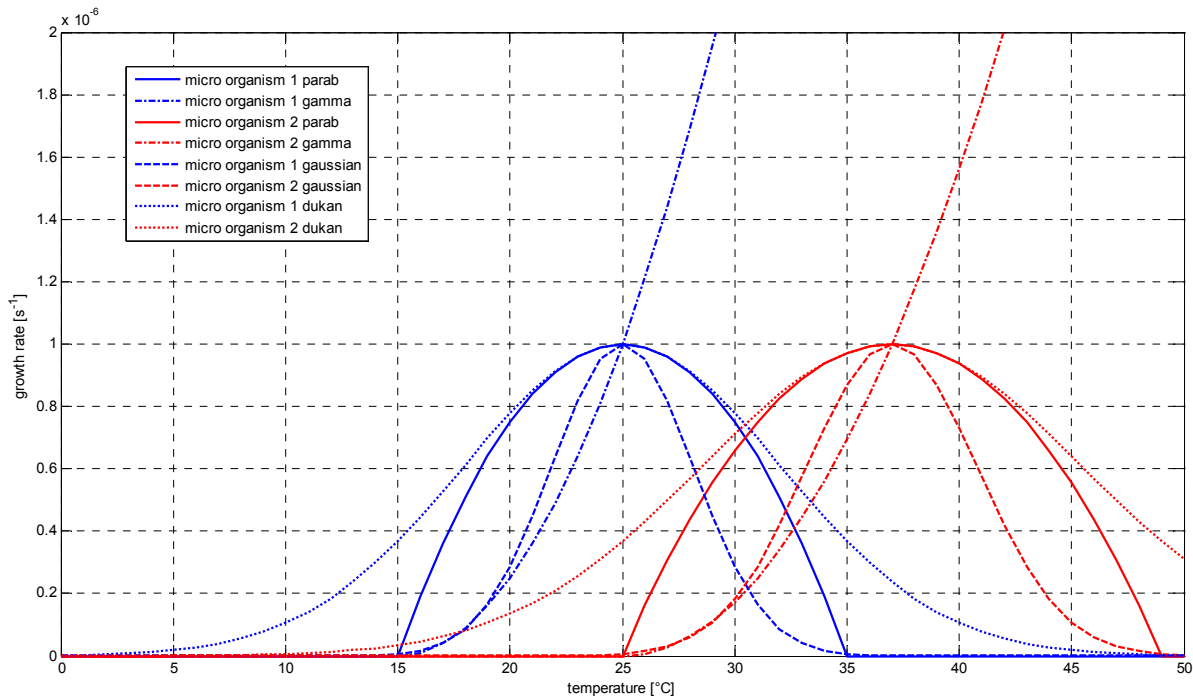
'Dukan' model

Het groeimodel beschreven door Dukan e.a. (1996) is opgesteld voor de ontwikkeling van bacteriën in drinkwater distributiesystemen. Het is gebruikt in meerdere onderzoeken binnen modellering van distributienetten (Rubulis e.a., 2007; Munavalli en Mohan Kumar, 2004; Digiano en Zhang, 2004).

Het 'Dukan' model beschrijft de groeisnelheid als volgt:

$$\mu = \mu_{opt} \cdot e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{(T_{min}-T_{opt})^2}}$$

In onderstaande Figuur I-2 is het Dukan model opgenomen met $\mu_{opt} = 1.10^{-6} s^{-1}$.



Figuur I-2 De groeisnelheid als functie van de temperatuur volgens het gamma model, een parabolische functie, een Gaussian model en het model van Dukan voor twee verschillende m.o.

Opvallend is dat de groeisnelheid bij verschillende temperaturen een vergelijkbaar verloop hebben voor het gamma-model, een Gaussian model en het model van Dukan. Alleen de snelheid waarmee de groeisnelheid toeneemt met temperatuur is zeer verschillend. Om een keuze te maken voor de modellen en voor de daarin aanwezige parameters is het nodig om praktijkwaarden voor groeisnelheden op te zoeken in de literatuur.

I.2. Optimale groeisnelheden voor verschillende micro-organismen

Een vuistregel voor de toename van de groeisnelheid met temperatuur is: 10°C temperatuurstijging zorgt voor een verdubbeling van de groeisnelheid. Deze vuistregel is gebaseerd op kenmerkende waarden voor de activeringsenergie van 60 kJ/mol (Van Loosdrecht, xxxx).

In de literatuur komen verschillende waarden voor de optimale groeisnelheid voor (Tabel I-1).

Tabel I-1 Literatuurwaarden voor optimale groeisnelheden voor verschillende micro-organismen.

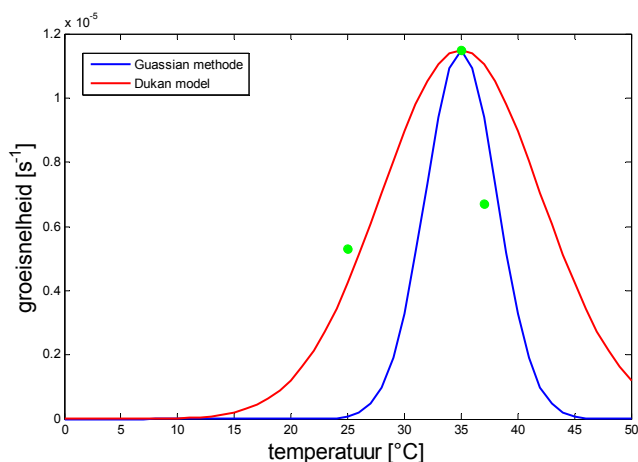
m.o.	$\mu_{opt} [s^{-1}]$	referentie
<i>Aeromonas</i>	2,78.10-5	Blokker en Schaap, 2008
<i>E.coli</i>	5,8.10-4	Veenendaal, pers. com.
<i>Legionella</i>	1,15.10-5	Wadowsky et al., 1985
groei micro-organismen in distributienet	5,56.10-5	Rubulis et al., 2007 met μ_{max} uit Camper 1996

In Wadowsky e.a.(1985) worden een aantal verdubbelingstijden gegeven voor *Legionella Pneumonia* bij verschillende temperaturen. In Tabel I-2 zijn deze gegevens weergegeven en omgerekend naar de bijbehorende groeisnelheid.

Tabel I-2 Groeikarakteristieken van *Legionella pneumonia* bij verschillende temperaturen (Wadowsky e.a.,1985).

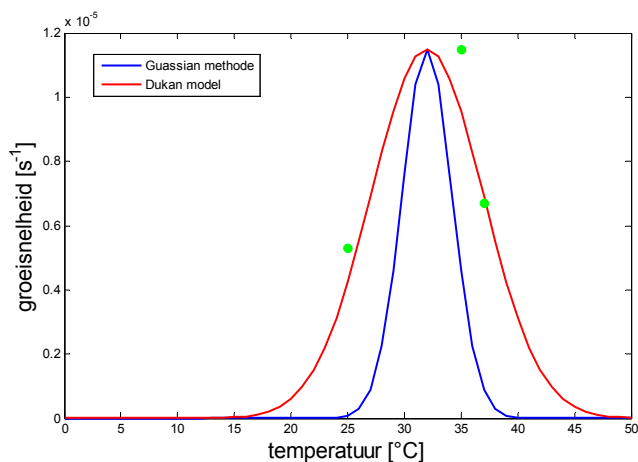
Temperatuur	lag phase	verdubbelingstijd	μ [s^{-1}]
25°C	18-20 dagen	36,1 h	$5,3 \cdot 10^{-6}$ [s^{-1}]
32-35°C	7 dagen	16,8 h	$1,15 \cdot 10^{-5}$ [s^{-1}]
37°C	7 dagen	28,8 h	$6,69 \cdot 10^{-6}$ [s^{-1}]

Deze data zijn vergeleken met het Gaussian model en het model van Dukan ($\mu_{opt} = 1,15 \cdot 10^{-5}$ [s^{-1}], $T_{min} = 25$ °C en $T_{opt} = 35$ °C) in Figuur I-3.



Figuur I-3 De groeisnelheid als functie van de temperatuur volgens een Gaussian model en het model van Dukan voor *Legionella pneumonia* ($\mu_{opt} = 1,15 \cdot 10^{-5}$ [s^{-1}], $T_{min} = 25$ °C en $T_{opt} = 35$ °C) en volgens experimentele data.

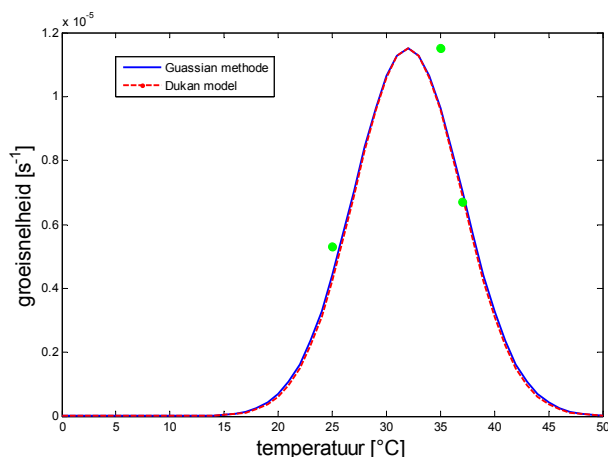
Met $T_{min} = 25$ °C en $T_{opt} = 32$ °C wordt dit (Figuur I-4):



Figuur I-4 De groeisnelheid als functie van de temperatuur volgens een Gaussian model en het model van Dukan voor *Legionella pneumonia* ($\mu_{opt} = 1,15 \cdot 10^{-5}$ [s^{-1}], $T_{min} = 25$ °C en $T_{opt} = 32$ °C) en volgens experimentele data.

De stijging van de groeisnelheid met de temperatuur voorspeld met het model van Dukan komt beter overeen met de experimenteel gevonden waarden dan het Gaussian model. Echter is er wel groei waarneembaar bij temperaturen onder de minimale groeitemperatuur (T_{min}) van 25°C. Dit komt niet overeen met de betekenis van de minimale groeitemperatuur. In het artikel van Dukan wordt deze waarde waarschijnlijk om deze reden coëfficiënt genoemd.

Het verloop van beide modellen is echter vergelijkbaar. Omdat T_{min} in het Dukan model niet de echte betekenis weergeeft, kan daarom gekozen worden voor het Gaussian model, waarbij T_{min} wel de daadwerkelijke minimale temperatuur weergeeft. Als namelijk bij het Gaussian model T_{min} (zoals uit grafiek blijkt) van 16°C wordt ingevuld wordt dezelfde grafiek verkregen als voor het Dukan model (Figuur I-5). Daarmee beschrijft het Gaussian model de groeisnelheid hetzelfde als het Dukan model, dat in meerdere gepubliceerde dynamische modellen voor drinkwater wordt toegepast.



Figuur I-5 De groeisnelheid als functie van de temperatuur volgens een Gaussian model ($\mu_{opt} = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ [s}^{-1}\text{]}$, $T_{min} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ en $T_{opt} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$) en het model van Dukan voor *Legionella pneumonia* ($\mu_{opt} = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ [s}^{-1}\text{]}$, $T_{min} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ en $T_{opt} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$) en volgens experimentele data.

I.3 Keuze groeimodel en parameters voor fictieve micro-organismen

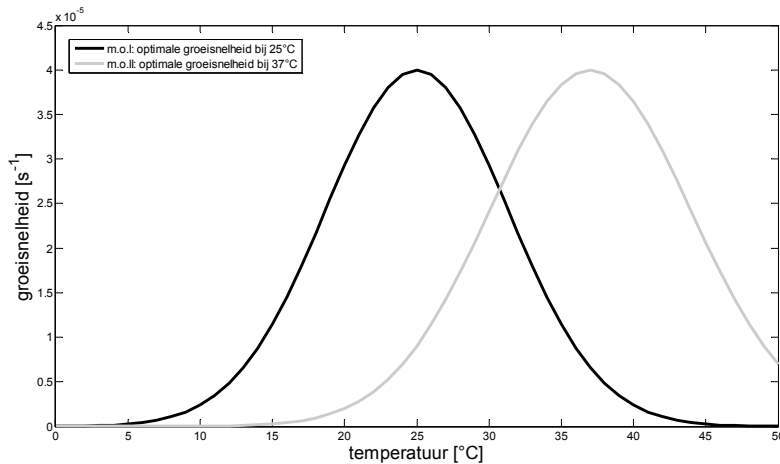
Op basis van het literatuuronderzoek naar groeimodellen (paragraaf I.1) en optimale groeisnelheden (paragraaf I.2) wordt als groeimodel het Gaussian model gebruikt, omdat daarin de minimale groeitemperatuur een fysische betekenis heeft en overeenkomt met T_{min} . Het gebruikte groeimodel wordt dus:

$$\mu = \mu_{opt} \cdot e^{-\frac{(T-T_{opt})^2}{0,2 \cdot (T_{min}-T_{opt})^2}}$$

De literatuurwaarden voor de optimale groeisnelheden (Tabel I.1) laat zien dat $\mu_{opt} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ [s}^{-1}\text{]}$ een goede gemiddelde waarde is. Deze waarde betekent een toename van 1 naar 1000 in 48 uur. Om verschillende groeikarakteristieken mee te nemen worden twee fictieve m.o. met optimale groeitemperaturen van 25°C en 37°C meegenomen. De minimale groeitemperaturen T_{min} zijn zodanig uitgekozen dat voldaan wordt aan de genoemde vuistregel: 10°C temperatuurstijging zorgt voor een verdubbeling van de groeisnelheid (Van Loosdrecht, 2007). In Tabel I.3 zijn de groeikarakteristieken van beide micro-organismen weergegeven. De resulterende figuren, die het verband tussen de groeisnelheid en de temperatuur weergeven, zijn te zien in Figuur I.6.

Tabel I.3 Optimale groeisnelheid, minimale en optimale groeitemperatuur voor twee fictieve m.o.

fictief micro-organisme	parameters in het groeimodel		
	$\mu_{opt} \text{ [s}^{-1}\text{]}$	$T_{min} \text{ [}^\circ\text{C]}$	$T_{opt} \text{ [}^\circ\text{C]}$
micro-organisme I	$4 \cdot 10^{-5}$	5	25
micro-organisme II	$4 \cdot 10^{-5}$	15	37



Figuur I.6 De groeisnelheid bij verschillende temperaturen voor twee fictieve m.o.: m.o. I met een optimale groeitemperatuur van 25°C en m.o. II met een optimale groeitemperatuur van 37°C.

Referenties

Dukan, S., Y. Levi, P. Piriou, F. Guyon and P. Villon (1996). Dynamic modeling of bacterial growth in drinking water networks. *Water Research*, vol. 30, no. 9, p. 1991-2002.

Digiano, F.A. en W. Zhang (2004). Uncertainty analysis in a mechanistic model of bacterial regrowth in distribution systems. *Environmental Science and Technology*, vol. 39, no. 22, p. 5925-5931.

Munavalli, G.R. en M.S. Mohan Kumar (2004). Dynamic simulation of multicomponent reaction transport in water distribution systems. *Water Research*, vol. 38, p. 1971-1988.

Van Gerwen, S.J.C. and M.H. Zwietering (1998). Growth and inactivation models to be used in quantitative risk assessments. *Journal of Food Protection*, vol. 61, no. 11, p. 1541-1549.

Van Loosdrecht, M. (2007). *Advanced course on environmental microbiology*. Delft: TU Delft.

