



BTO 2014.029 | September 2014

## BTO rapport

Benodigde  
materiaaleigenschappen  
voor ondiepere ligging  
leidingen



## BTO

Benodigde materiaaleigenschappen voor ondiepere  
ligging leidingen

BTO 2014.029 | September 2014

Projectnummer  
400341

Projectmanager  
Nellie Slaats

Opdrachtgever  
BTO- Speerpuntonderzoek

Kwaliteitsborger(s)  
Jan Vreeburg

Auteur(s)  
Mirjam Blokker, George Mesman

Verzonden aan  
Dit rapport is selectief verspreid onder medewerkers  
van BTO-participanten en is verder niet openbaar.

Jaar van publicatie  
2014

Meer informatie

T 030-6069533  
E [Mirjam.Blokker@kwrwater.nl](mailto:Mirjam.Blokker@kwrwater.nl)

PO Box 1072  
3430 BB Nieuwegein  
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511  
F +31 (0)30 60 61 165  
E [info@kwrwater.nl](mailto:info@kwrwater.nl)  
I [www.kwrwater.nl](http://www.kwrwater.nl)



BTO 2014.029 | September 2014 © KWR

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd,  
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.



# Inhoud

1	Inleiding	4
2	Benodigde thermische isolatie van leidingmateriaal	6
2.1	Aanpak	6
2.2	Hydraulisch model	6
2.3	<b>Scenario's</b>	10
2.4	Bepalen van thermische isolatie leidingmateriaal: theoretische beschrijving	10
2.5	Temperatuureis: criterium voor benodigde isolatiewaarde	12
2.6	Berekeningen thermische isolatie	12
2.7	Discussie en conclusies	15
3	Benodigde thermische isolatie door bodem en bodembedekking	17
3.1	Aanpak	17
3.2	Opwarming van de bodem	17
3.3	Discussie en conclusies	22
4	Vorstindringing	24
4.1	Inleiding	24
4.2	Relatie wintergetal en vorstindringing	24
4.3	Historische gegevens vorstindringing	29
4.4	Vorschade bij Brabant Water	31
4.5	Discussie en conclusies	32
5	Vereiste materiaaleigenschappen bij 60 cm diepteligging	34
5.1	Voorkomen bevrozing leiding	34
5.2	Voorkomen opwarmen van de leiding	34
5.3	Benodigde sterkte	36
5.4	Discussie	39
5.5	Conclusies materiaaleisen op 60 cm diepteligging leiding	40
6	Conclusies	41
7	Discussie over het concept TNT	42
8	Literatuur	44

# 1 Inleiding

In de visie van Brabant Water wordt het vertakte distributienet in de toekomst op een andere manier aangelegd, het tertiaire net van de toekomst (TNT):

*De waterleiding in de woonwijken is niet veel dikker dan een tuinslang en van geheel nieuw materiaal (isolerend, Gardena-aansluitingen). Ingebouwde sensoren voor druk- en volumemeting zorgen voor snelle detectie van lekkages. Snelle aanlegtechnieken zorgen voor een minimum aan overlast voor de burger. De flexibele waterleiding wordt twee schoppen diep aan weerszijden van de straat aangelegd. Het drinkwaternet is 'groen' en 'slim': geen onderhoud en van recyclebare materialen, geen graafschade door zelfdetectie. Het nieuwe net wordt brandkraanloos ontworpen.*

In het speerpuntonderzoek Leidingnet van de toekomst in 2011-2012 is geïnventariseerd welke kansen en bedreigingen dit concept met zich meebrengt (Vloerbergh et al., 2013). Uit de haalbaarheidsstudie bleek dat de aspecten "niet veel dikker dan een tuinslang", "weerszijden van de straat" en "brandkraanloos" kansrijk zijn.

---

Minimaal gedimensioneerd, zelfreinigend, zonder bluscapaciteit (Vloerbergh et al., 2013)

Brabant Water levert bluswater vanuit het secundaire net, en niet meer vanuit het TNT. Hierover dient afstemming met de brandweer plaats te vinden. In veel gevallen is er voldoende ruimte om 30 m<sup>3</sup>/h te leveren vanuit een vertakt net. Het verdwijnen van de blusfunctie van het tertiaire net zorgt dat in enkele gevallen waarin dat er kleiner gedimensioneerd kan worden.

Het is aan te bevelen om **bij het ontwerp over te stappen van de  $q\sqrt{n}$ -methode** naar het gebruik van een op SIMDEUM gebaseerde methodiek (DiVerDi\_SIMDEUM), waarmee ook toekomstig waterverbruik kan worden gemodelleerd. Bij het ontwerpen met DiVerDi\_SIMDEUM zijn de verschillen met de huidige praktijk beperkt, en het ontwerpen met DiVerDi\_SIMDEUM is toekomstbestendiger. Bij het ontwerpen op deze wijze kan bewust rekening worden gehouden met veranderingen in drinkwatervraag, zoals gevolgen van technologische ontwikkelingen en demografische ontwikkelingen.

Voor een aantal praktijksituaties zal getoetst moeten worden, met DiVerDi\_SIMDEUM, of dubbelzijdige of enkelzijdige ligging in de straat voldoende druk en de zelfreinigende snelheid kunnen halen. Daarnaast dient het aanbeveling om een afwegingskader op te stellen voor het leggen van drinkwaterleidingen aan weerszijden van de straat, waarin rekening gehouden wordt met kosten van materiaal, aanleg en onderhoud.

Met het minimaal dimensioneren kan direct worden gestart.

---

Uit de haalbaarheidsstudie bleek dat het aspect “twee schoppen diep” nader onderzoek vergt.

---

#### Gewijzigde diepteligging (60 cm onder maaiveld) (Vloerbergh et al., 2013)

Een verminderde diepteligging levert een aanzienlijke kostenbesparing, de aanleg en beheerskosten (per ingreep) kunnen worden gereduceerd met 20 - 40 % (afhankelijk van de grondwaterstand). Een verminderde diepteligging heeft een aantal consequenties. De invloed van de buitentemperatuur is groter voor een leiding op een liggingsdiepte van 60 cm. Dit resulteert in opwarming van het water boven temperaturen van 25 °C in de zomer en een grotere kans op bevroering in de winter. De leidingen dienen dan beter geïsoleerd te worden; bij ondiepere ligging is de invloed van externe belasting groter en is dus steviger materiaal nodig; verminderde diepteligging leidt tot een toename in de graafschade. Een duidelijke registratie van de diepteligging en afstemming met andere partijen kan eraan bijdragen om graafschade te voorkomen.

Voor het aspect leidingen aanleggen op 60 cm is aanbevolen eerst meer onderzoek te doen in hoeverre dit echt voorbeelden biedt.

---

De belangrijkste aanbeveling uit het voortraject voor nader onderzoek is het onderwerp van voorliggend onderzoek: het onderzoek naar een geschikt leidingmateriaal dat voldoende isolatiewaarde en mechanische sterkte bezit. En waarbij ook wordt gekeken naar de flexibiliteit en recyclebaarheid van het materiaal, het eenvoudig kunnen maken van aansluitingen op leidingen van dit materiaal, de aanlegtechniek en het benodigd onderhoud.

De bodemtemperatuur rond de leiding bepaalt voor een heel groot deel de temperatuur van het drinkwater. Op 60 cm diepte is de bodemtemperatuur ten opzichte van de bodemtemperatuur op 1 m diepte in de zomer hoger en in de winter lager. Dat betekent in de zomer meer overschrijdingen van de 25 °C grens en in de winter meer kans op vorst op 60 cm diepte. Hoofdstuk 2 gaat in op de thermische isolatie die nodig is om bij verschillende **scenario's van de bodemtemperatuur (0, 25 en 28 °C)** de kans op te lage of te hoge temperaturen in het leidingnet te beperken. Hoofdstuk 3 kijkt naar de mogelijkheden die er zijn om in de zomer de bodemtemperatuur minder sterk te laten oplopen door de warmte-indringing in de bodem te beperken. Gekeken is naar opties voor het verhogen van de reflectie op het oppervlak, het verhogen van de verdamping en het toepassen van bodemmateriaal met andere thermische eigenschappen. In hoofdstuk 4 wordt gekeken naar de vorstindringing in de bodem, en de relatie met materiaalschade. Hoofdstuk 5 gaat in op de vereiste materiaaleigenschappen: materialen die voldoen aan de uit hoofdstuk 2 volgende thermische isolatiewaarde en de eisen aan sterkte van de materialen. Ook wordt de techniek voor aanleg bediscussieerd. In hoofdstuk 6 volgen conclusies over de benodigde materiaaleigenschappen om leidingen minder diep aan te leggen. In hoofdstuk 7 volgt een beschouwing van de overige aspecten van het TNT.



## 2 Benodigde thermische isolatie van leidingmateriaal

### 2.1 Aanpak

Uitgangspunt is dat het secundaire net op 1 meter diep ligt, en het TNT op 60 cm diep. Dat betekent dat de temperatuur van het drinkwater aan het begin van het tertiaire net gelijk is aan de bodemtemperatuur op 1 meter diepte. De vraag is welke thermische isolatiewaarde nodig is voor de leidingen in het TNT zodat de temperatuur van het drinkwater dat bij de knopen (met verbruik groter dan 0) aankomt binnen de eisen blijft: in de zomer lager dan 25 °C, en in de winter hoger dan 0 °C.

In het TNT 2011/2012 (Vloerbergh et al. 2013) zijn vijf ontwerpen gemaakt van een tertiair net in een woonwijk in Helmond (twee vermaasde structuren en drie vertakte structuren). De ontwerpen verschillen in leidingdiameters, -lengtes, en -layout, waardoor andere snelheden en verblijftijden optreden en dus andere eindtemperaturen bereikt zullen worden voor de verschillende gebruikers / verbruiksknopen. Brabant Water heeft vijf ontwerpen aangeleverd van een tertiair net:

- A. Bestaande situatie, vermaasd net; (anno 1212)
- B. Bestaande situatie, extra vermaasd; (ten tijde van de wijkontwikkeling)
- C. Vertakt net met bluscapaciteit;
- D. Vertakt net zonder bluscapaciteit, met enkelzijdige ligging
- E. Vertakt net zonder bluscapaciteit, met dubbelzijdige ligging (weerszijden van de straat).

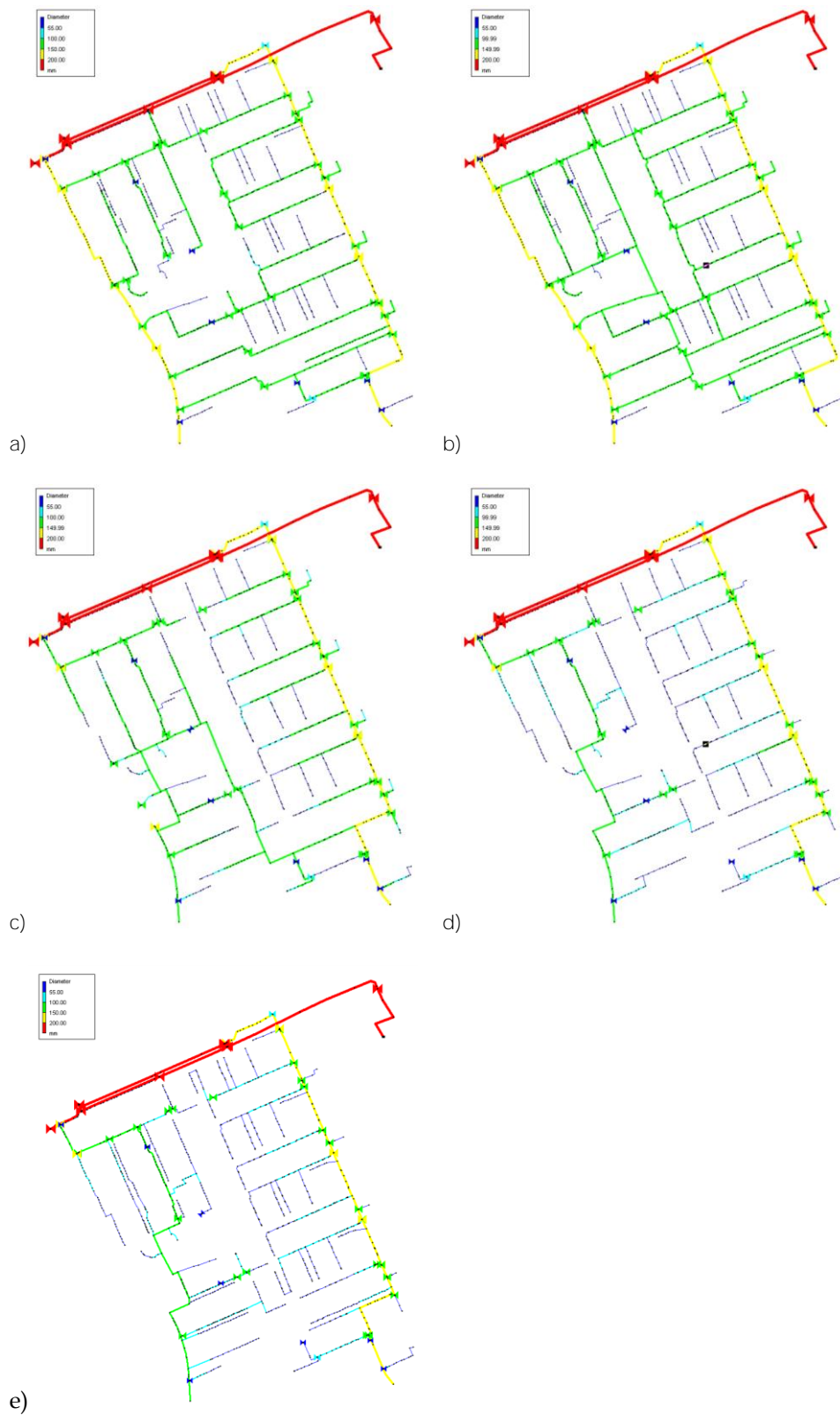
Voor deze ontwerpen (§ 2.2) **zijn verschillende scenario's doorgerekend met een variatie in** 1) de ingaande temperatuur aan het begin van het ; 2) de bodemtemperatuur rond de leidingen van het TNT (§ 2.3) en 3) de isolatiewaarde van de leidingen in het TNT (§ 2.4). Het doel van dit onderdeel van het project is het bepalen van de benodigde thermische isolatiewaarde. Omdat deze waarde vooral indicatief is, is gerekend met telkens 1 set verbruikspatronen per leidingnetconfiguratie. De variatie in verbruik is dus niet apart meegenomen. Vervolgens is bepaald welke isolatiewaarde voldoende is om aan de gestelde temperatuureis (§ 2.5) te voldoen; de resultaten staan in § 2.6.

### 2.2 Hydraulisch model

#### 2.2.1 Diameter en materialen

Leidingen met diameter 200 mm en groter (de rode leidingen in Figuur 2-1) worden verondersteld toe te behoren aan het primaire net en worden niet aangepast in het nieuwe ontwerp. De doorgaande Ø150 mm leiding aan de oostkant (gele leiding) is onderdeel van het secundaire net, maar wordt in het nieuwe ontwerp door een PVC-leiding vervangen. Beide functionele leidingtypes zijn vastgelegd in een streefstructuur en vormen de basis van waaruit de tertiaire leidingnetvarianten ontworpen zijn (voor de leidinglengtes en -inhoud zie rapport Vloerbergh et al., 2013, hoofdstuk 6 en bijlage III). De vertakte netten zonder bluscapaciteit (varianten D en E) hebben kortere leidinglengtes en minder inhoud.





*Figuur 2-1. Ontwerpen tertiaire net a) bestaand; b) bestaand, extra vermaasd; c) vertakt met bluswater; d) vertakt met enkelzijdige ligging in de straat; e) vertakt met dubbelzijdige ligging in de straat.*

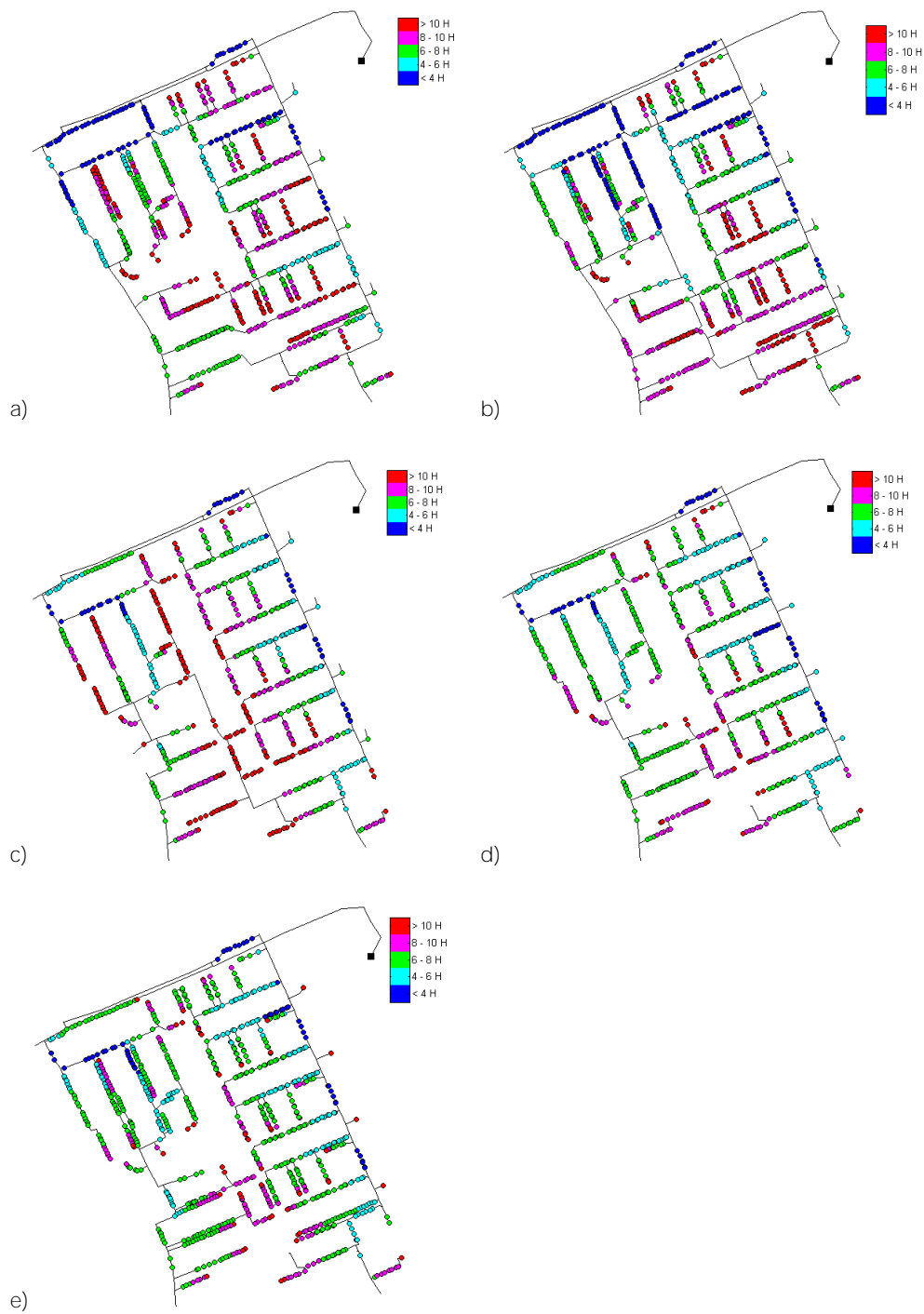
### 2.2.2 Verbruiken

In het hydraulisch model zijn de verbruiken op de huishoudelijke knopen met SIMDEUM gegenereerd (tijdstep van 5 minuten). Op de knopen linksonder, linksboven en rechtsonder wordt doorgeleverd aan andere wijken met een patroon dat door Brabant Water is aangeleverd (huishoudelijk patroon).

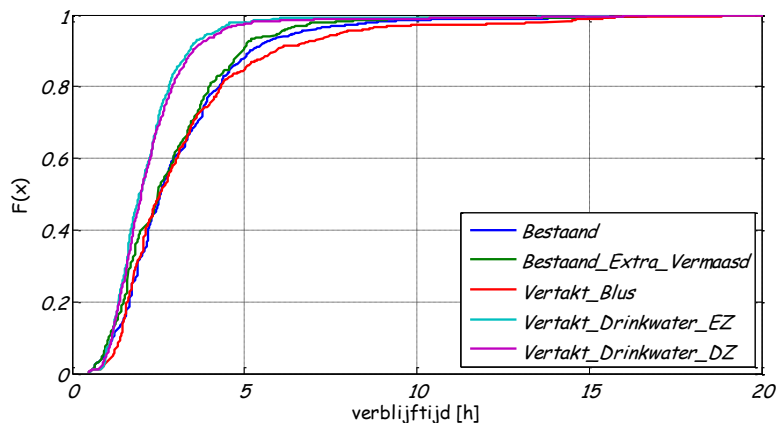
In InfoWorks zijn de namen van de *customer points* voor de verschillende ontwerpen gelijk. De knoopnamen en knoopaantallen zijn niet precies gelijk in de vijf modelvarianten. De verbruikspatronen die op de knopen staan zijn daardoor ook niet precies dezelfde in de vijf modellen. Bij de export naar EPANET worden de verbruiken aan knoopnamen gekoppeld en gaan de namen van de *customer points* verloren. De SIMDEUM-patronen op de verschillende verbruikspunten zijn dus niet exact gelijk voor alle netconfiguraties. Omdat de SIMDEUM-verbruikspatronen stochastisch zijn, moet bij de interpretatie van de resultaten rekening worden gehouden met de effecten van de variatie in verbruik. Dat betekent dat er 1% overschrijdingen in het ene scenario, in een ander scenario wellicht 1,3% of 0,7% overschrijdingen zou betekenen. Maar de verschillen zullen beperkt zijn.

### 2.2.3 Verblijftijden

De maximale verblijftijden zijn bepaald voor de verschillende ontwerpen. Figuur 2-2 laat de resultaten zien van de modellen met SIMDEUM-verbruiken. Figuur 2-3 laat de cumulatieve frequentieverdeling zien van de verblijftijden op de knopen met verbruik. Duidelijk te zien is dat de verblijftijden in de vertakte netten zonder bluscapaciteit het kortst zijn; de verblijftijden in het vertakte net met bluscapaciteit is vergelijkbaar met de verblijftijden in de vermaasde ontwerpen.



*Figuur 2-2. Maximale verblijftijden in het tertiaire net (vanaf de voedende leiding), met SIMDEUM-patronen a) bestaand; b) bestaand, extra vermaasd; c) vertakt met bluswater; d) vertakt met enkelzijdige ligging in de straat; e) vertakt met dubbelzijdige ligging in de straat.*



Figuur 2-3. Cumulatieve waarschijnlijkheidsverdeling van de verblijftijd op de knopen met huishoudelijk verbruik in de verschillende netontwerpen.

### 2.3 Scenario's

Met het bodemtemperatuurmodel is berekend dat het temperatuurverschil van de bodem op 60 cm en 1 m diepte ongeveer 2 tot 5 graden is (bijlage 1). Voor de worst case situatie van het klimaatscenario 2040 bij zandgrond zijn vijf verschillende temperatuurscenario's gedefinieerd (Tabel 2-1). Voor deze scenario's zal de benodigde thermische isolatiewaarde van het leidingmateriaal worden bepaald in deze 5 ontwerpen van het TNT.

Tabel 2-1 Scenario's voor het bepalen van de thermische isolatiewaarde.

Scenario	temperatuur ingaand tertiaire leidingnet (bodem 1 meter diep)	temperatuur wand TNT (bodem 60 cm diep)
zomer_1	24,9	27
zomer_2	20	27
zomer_3	23	25
zomer_4	20	25
winter*	2	0

\* Bij de berekening van de winterse temperatuur wordt geen rekening gehouden met mogelijke faseovergangen van water naar ijs. De overgang van water naar ijs is een ander proces dan afkoelen van water dat meer energie kost. De faseovergang zit niet in het model en het is daarom niet mogelijk om een uitspraak te doen over de situatie bij temperaturen lager dan 0 °C.

### 2.4 Bepalen van thermische isolatie leidingmateriaal: theoretische beschrijving

De temperatuur van het stromende water na een bepaalde tijdsduur wordt als volgt beschreven (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2013a):

$$\frac{dT_{water}}{dt} = \frac{2k}{\rho_{water} r C_{p,water}} (T_{outerwall} - T_{water}) \quad (1)$$

met  $T_{water}$  de temperatuur van het volume water [K],  $T_{outerwall}$  de temperatuur van de buitenkant van de wand [K], welke gelijk is verondersteld aan de temperatuur van de omringende bodem,  $r$  de leidingradius (= ½ leidingdiameter  $d_{pipe}$ ) [m] en  $k$  de totale warmteoverdrachtscoëfficiënt [W/m<sup>2</sup>.K]. De totale warmteoverdrachtscoëfficiënt  $k$  wordt bepaald door de geleiding door de wand (aangeduid met subscript pipe wall) en convectie door het drinkwater (aangeduid met subscript water; merk op dat de diameter van het water gelijk is aan de binnendiameter van de leiding  $d_{pipe}$ ):

$$k = \frac{1}{\frac{d_{\text{pipe wall}}}{\lambda_{\text{pipe wall}}} + \frac{1}{\alpha}} = \frac{1}{\frac{d_{\text{pipe wall}}}{\lambda_{\text{pipe wall}}} + \frac{d_{\text{pipe}}}{\lambda_{\text{water}} Nu}} \quad (2)$$

Met  $\lambda^*$

$$\lambda^* = \frac{\lambda_{\text{water}}}{\lambda_{\text{pipe wall}}} \cdot \frac{d_{\text{pipe wall}}}{d_{\text{pipe}}} \quad (3)$$

en

$$\alpha_{\text{water}} = \frac{\lambda_{\text{water}}}{\rho_{\text{water}} \cdot C_{p,\text{water}}} \quad (4)$$

kan vergelijking 1 worden herschreven:

$$\frac{dT_{\text{water}}}{dt} = \frac{\alpha_{\text{water}}}{r^2 \left( \lambda^* + \frac{1}{Nu} \right)} (T_{\text{outer wall}} - T_{\text{water}}) \quad (5)$$

Hoe groter de waarde van  $\lambda^*$  des te langzamer de temperatuuroverdracht is. Typisch geldt voor PVC met kleine diameters  $\lambda^* \approx 0,15$  (Tabel 2-2) en voor gecementeerd GGI

$\lambda^* = \frac{60}{8,9 \cdot 10} = 6,7e-3$ . In de simulaties wordt de waarde van  $\lambda^*$  gevarieerd, zonder ons

in eerste instantie af te vragen of dit kan worden bereikt met een grotere diameter, een materiaal met een andere thermische overdrachtscoëfficiënt of wellicht een samengestelde wand.

**Tabel 2-2. Typische diameters en wanddikten van PVC-leidingen (BRL-K17301); PN10 voor kleine diameters, PN6 voor grotere diameters. De  $\lambda^*$  is berekend met een  $\lambda_{\text{PVC}} = 0,16 \text{ W/m.K}$ .**

diameter (mm)	binnendiameter (mm)	D (mm)	$\lambda^*$
40	36,2	1,9	0,20
50	46	2	0,16
63	59	2	0,13
75	70,6	2,2	0,12
90	85,6	2,2	0,10
110	104,6	2,7	0,10
160	152	4	0,10
200	190,2	4,9	0,10
250	237,6	6,2	0,10
315	299,6	7,7	0,10

Vergelijking (2) is een vereenvoudiging die toegepast kan worden bij relatieve kleine wanddiktes. Bij grotere wanddiktes moet rekening gehouden worden met de vorm van de leiding (rond) en wordt  $k$  bepaald door:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{pipe}}{2\lambda_{pipewall}} \ln\left(\frac{d_{pipe} + d_{pipewall}}{d_{pipe}}\right) + \frac{d_{pipe}}{\lambda_{water}Nu}} \quad (6)$$

Wanneer ook nog isolatie wordt toegepast wordt  $k$  bepaald door:

$$k = \frac{1}{\frac{d_{pipe}}{2\lambda_{pipewall}} \ln\left(\frac{d_{pipe} + d_{pipewall}}{d_{pipe}}\right) + \frac{d_{pipe} + d_{wall}}{2\lambda_{isolatie}} \ln\left(\frac{d_{pipe} + d_{pipewall} + d_{isolatie}}{d_{pipe} + d_{pipewall}}\right) + \frac{d_{pipe}}{\lambda_{water}Nu}} \quad (7)$$

En  $\lambda^*$  wordt dan bepaald door:

$$\lambda^* = \frac{\lambda_{water}}{d_{pipe}} \left( \frac{d_{pipe}}{2\lambda_{pipewall}} \ln\left(\frac{d_{pipe} + d_{pipewall}}{d_{pipe}}\right) + \frac{d_{pipe} + d_{wall}}{2\lambda_{isolatie}} \ln\left(\frac{d_{pipe} + d_{pipewall} + d_{isolatie}}{d_{pipe} + d_{pipewall}}\right) \right) \quad (8)$$

In hoofdstuk 3 is de benodigde  $\lambda^*$  bepaald; in hoofdstuk 5 zijn de wanddiktes en diktes van isolatiemateriaal bepaald op basis van vergelijking 8.

## 2.5 Temperatuureis: criterium voor benodigde isolatiewaarde

Om te bepalen of de thermische isolatiewaarde voldoende is, is een criterium nodig. Uit de voorloper van dit onderzoek (Vloerbergh et al. 2013) is reeds gebleken dat de gemodelleerde drinkwatertemperatuur op veel verbruiksknoppen gelijk is aan de bodemtemperatuur. Ook bij grotere isolatiewaardes zal dit naar alle waarschijnlijkheid het geval zijn. Het criterium kan dus niet zijn dat “de temperatuur op iedere knoop gedurende de gehele dag onder de 25 °C moet zijn”. Omdat ook gebleken is dat wanneer de temperatuur op een knoop op enig moment van de dag boven (of op) de 25 °C komt, dit meestal gedurende een groot deel van de dag het geval is, wordt niet gekeken naar de tijdsduur van de overschrijding. In plaats daarvan wordt een overschrijding op enkele plaatsen “toegestaan”.

Het criterium dat gehanteerd wordt is dat “de temperatuur op maximaal 1% van de verbruiksknoppen (knoop met verbruik >0 m<sup>3</sup>/h) op enig moment van de dag boven (of op) de 25 °C komt”.

## 2.6 Berekeningen thermische isolatie

### 2.6.1 Gevoeligheidsanalyse

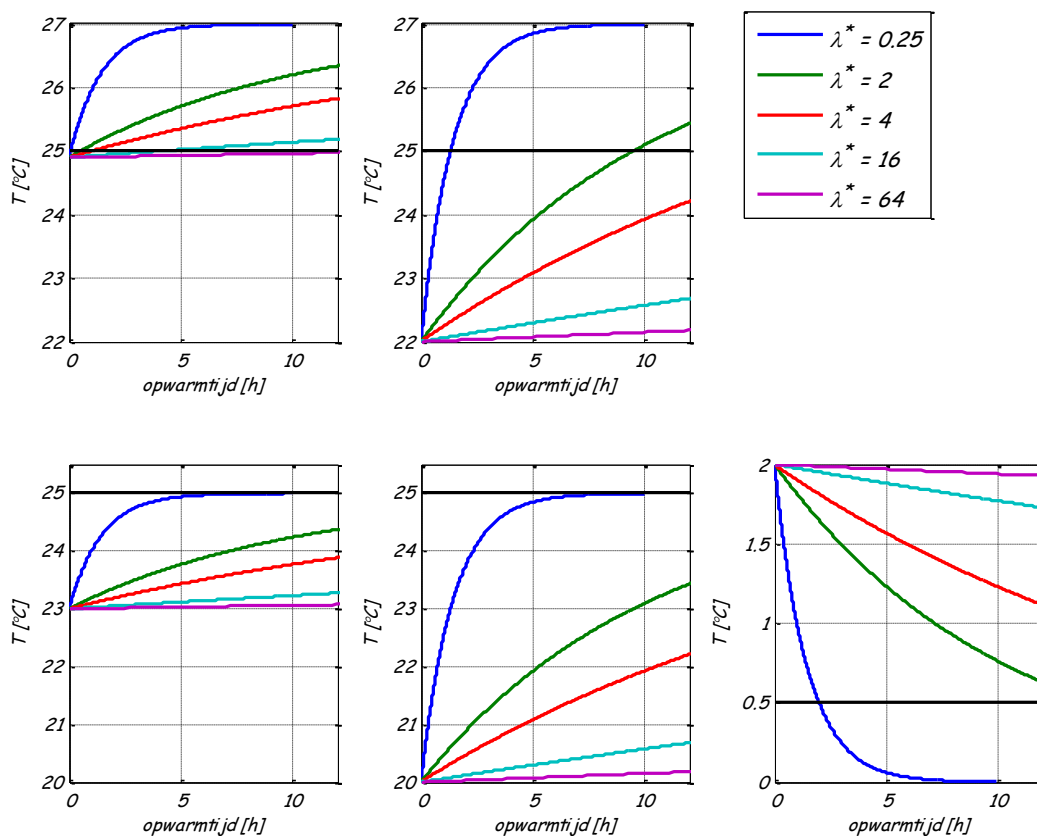
De eerste stap is om een gevoeligheidsanalyse te doen voor  $\lambda^*$  voor de vier scenario's. Daarvoor wordt een diameter gekozen (de meest voorkomende diameter in de ontwerpen A-E is 100 mm) en een lage snelheid (0,01 m/s). Figuur 2-4 laat de resultaten zien voor een variatie in  $\lambda^*$  van 0,25 – 64 waar  $\lambda^*$  telkens met een factor 4 wordt verhoogd. Er is maximaal 12 uur verblijftijd getoond in de figuur; dit is de maximale verblijftijd in het TNT (de vertakte ontwerpen zonder bluswatervraag, Figuur 2-3). Er geldt bij een temperatuurgradiënt van 2 graden het volgende:

- Een  $\lambda^* = 0,25$  leidt tot een temperatuursverandering van 2 graden binnen 12 uur;

- Een  $\lambda^* = 1,00$  leidt tot een temperatuursverandering van 1,37 graden in 12 uur;
- Een  $\lambda^* = 4,00$  leidt tot een temperatuursverandering van 0,88 graden in 12 uur;
- Een  $\lambda^* = 16,00$  leidt tot een temperatuursverandering van 0,27 graden in 12 uur;
- Een  $\lambda^* = 64,00$  leidt tot een temperatuursverandering van 0,07 graden in 12 uur;

Dit betekent het volgende:

- Wanneer de temperatuur aan het begin van het TNT al niet voldoet aan de eisen (in de zomer bijvoorbeeld al 25 graden is, scenario 1), dan zal bij een temperatuurverschil van 2 graden ook bij een zeer goed geïsoleerde leiding de temperatuur nog iets veranderen.
- Wanneer de temperatuur aan het begin van het TNT 1 graad afwijkt van de eisen (in de zomer bijvoorbeeld 24 graden is, scenario 2), dan is bij een temperatuurverschil van 2 graden een  $\lambda^*$  van 4 nodig om bij een maximale verblijftijd van 12 uur te voldoen aan de temperatureisen.
- Wanneer de temperatuur aan het begin van het TNT 2 graden afwijkt van de eisen (in de zomer bijvoorbeeld 23 graden is, scenario 3, of in de winter 2 graden is, scenario 4), dan is bij een temperatuurverschil van 2 graden een  $\lambda^*$  van 1 nodig om bij een maximale verblijftijd van 12 uur te voldoen aan de temperatureisen.



Figuur 2-4. Temperatuurverloop in een leiding  $\varnothing 100$  mm,  $v = 0,01$  m/s voor de vier zomerscenario's en 1 winterscenario (rechtsonder).

### 2.6.2 Berekeningen voor leidingnetconfiguraties

Voor ieder netwerkconfiguratie (A-E) is voor een range van thermische isolatiewaardes (0,25 – 64) is iedere temperatuurscenario doorgerekend. Vervolgens is bepaald op hoeveel knopen (ten opzichte van het totaal aantal knopen) de temperatuur van in de zomer 25 °C en in de



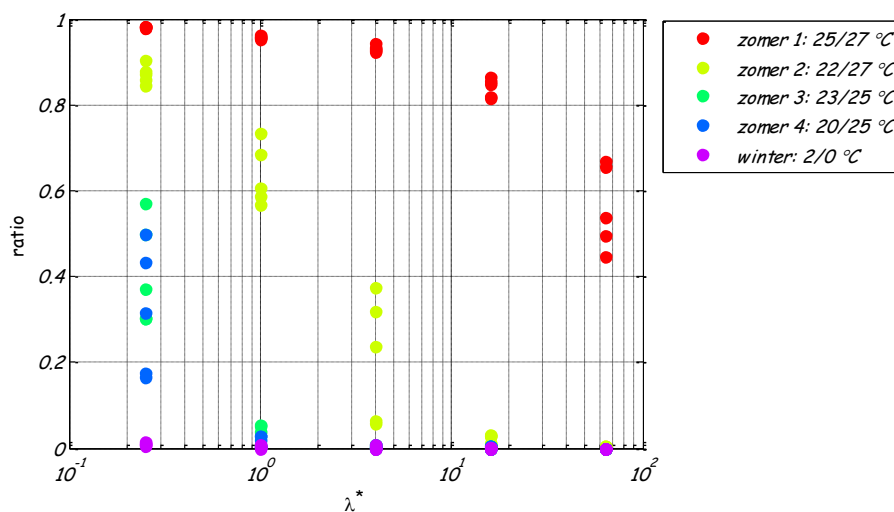
winter 0 °C wordt bereikt (Tabel 2-3, Figuur 2-5). Het doel is om zo min mogelijk overschrijdingen van de temperatuurseis te hebben. De volgende zaken vallen op:

- Voor scenario “zomer 1” is geen enkele waarde van  $\lambda^*$  voldoende om de temperatuur beneden de 25 °C te houden.
- Voor scenario “zomer 2” is een  $\lambda^*$  van 16,0 nodig in de vermaasde netten (A, B) en is een  $\lambda^*$  van 64,0 nodig in de vertakte netten (C-E) om de temperatuur in minstens 99% van de verbruiksknoppen beneden de 25 °C te houden.
- Voor scenario “zomer 3”/ “zomer 4” (bodemtemperatuur van 25 °C) is een  $\lambda^*$  van 1,0 voldoende in de vermaasde netten en vertakte netten met bluswater (A-C) en is een  $\lambda^*$  van 4,0 voldoende in de vertakte netten zonder bluswater (D, E) om de temperatuur in minstens 99% van de verbruiksknoppen beneden de 25 °C te houden.

Voor scenario “winter” (bodemtemperatuur van 0 °C) is een  $\lambda^*$  van 0,25 voldoende in alle netconfiguraties om de drinkwatertemperatuur in minstens 99% van de verbruiksknoppen boven de 0 °C te houden.

*Tabel 2-3. Aantal knopen (relatief ten opzichte van totaal aantal) dat een maximum temperatuur van 25 graden of hoger bereikt in verschillende netwerkconfiguraties, bij bepaalde thermische isolatie en temperatuurscenario's.*

netwerk- configuratie	$\lambda^*$	Temperatuurscenario				
		zomer 1	zomer 2	zomer 3	zomer 4	winter
A	0,25	0,98	0,87	0,30	0,17	0,01
A	1,00	0,96	0,59	0,01	0,00	0,00
A	4,00	0,93	0,06	0,00	0,00	0,00
A	16,00	0,86	0,01	0,00	0,00	0,00
A	64,00	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00
B	0,25	0,98	0,84	0,30	0,17	0,00
B	1,00	0,96	0,61	0,00	0,00	0,00
B	4,00	0,92	0,06	0,00	0,00	0,00
B	16,00	0,82	0,01	0,00	0,00	0,00
B	64,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
C	0,25	0,98	0,86	0,37	0,31	0,01
C	1,00	0,96	0,57	0,04	0,02	0,00
C	4,00	0,92	0,24	0,00	0,00	0,00
C	16,00	0,85	0,03	0,00	0,00	0,00
C	64,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
D	0,25	0,98	0,88	0,50	0,43	0,01
D	1,00	0,95	0,68	0,05	0,03	0,01
D	4,00	0,93	0,32	0,01	0,01	0,01
D	16,00	0,82	0,03	0,01	0,01	0,00
D	64,00	0,65	0,01	0,00	0,00	0,00
E	0,25	0,98	0,90	0,57	0,50	0,02
E	1,00	0,96	0,74	0,05	0,03	0,01
E	4,00	0,94	0,37	0,01	0,01	0,01
E	16,00	0,86	0,03	0,01	0,01	0,00
E	64,00	0,67	0,01	0,00	0,00	0,00



Figuur 2-5. Aantal knopen (relatief ten opzichte van totaal aantal) dat een maximum temperatuur van 25 graden of hoger bereikt in verschillende netwerkconfiguraties, bij bepaalde thermische isolatie en temperatuurscenario's.

## 2.7 Discussie en conclusies

De wintersituatie is niet kritisch voor de temperatuur van het drinkwater, maar mogelijk wel voor de schade aan het materiaal door bodembefreezing (zie hoofdstuk 4 en 5). Opwarming is een groter probleem dan afkoelen, zolang er geen sprake is van befreezing van het drinkwater. De thermische isolatie is dus vooral nodig om opwarming te beperken.

Voor de thermische isolatie  $\lambda^*$  geldt dat bij een bodemtemperatuur van 27 °C op -0,6 m (zomer 1, zomer 2) de isolatie van 64 niet voldoende is voor een temperatuur < 25 °C aan de tap (geen waarde van 0.00 in Tabel 2-3). Wanneer geaccepteerd wordt dat gedurende de dagen met hoge temperaturen een aantal aansluitingen een te hoge temperatuur ontvangen kan een lagere waarde van  $\lambda^*$  volstaan. Voor de vertakte netten (en dan met name die met de kleine diameters) geldt afhankelijk van het temperatuurscenario het volgende:

- Wanneer 1% van de knopen een te hoge temperatuur mag ontvangen (een waarde van 0.01 of lager in Tabel 2-3) is een waarde van  $\lambda^*$  van 64 nodig om zomer2 te doorstaan en een waarde van  $\lambda^*$  van 4 voor zomer3 en zomer4.
- Wanneer 10% van de knopen een te hoge temperatuur mag ontvangen (een waarde van 0.10 of lager in Tabel 2-3) is een waarde van  $\lambda^*$  van 16 nodig om zomer2 te doorstaan en een waarde van  $\lambda^*$  van 1 voor zomer3 en zomer4.

Bij een bodemtemperatuur van 25 °C op -0,6 m (zomer 3, zomer 4) lijkt een isolatie van 1 tot 4 voldoende om het aantal woningen met een temperatuur van 25 °C aan de tap te beperken. Voor de thermische isolatie van het leidingwater + leidingmateriaal geldt dan:

$$\lambda_{pipe\_wall} \frac{d_{pipe}}{d_{pipe\_wall}} = \frac{0.57}{\lambda^*} \text{ w/m.K} = 0.15 \text{ tot } 0.6 \text{ w/m.K}$$

PVC PN6 heeft een  $\lambda^*$  van 0,1. Standaard zijn geen leidingen met een  $\lambda^*$  van 1,0 of hoger beschikbaar. De thermische isolatie kan eventueel ook worden gerealiseerd door leidingen op te bouwen uit verschillende lagen van verschillende materialen (zie hoofdstuk 5).

Het verschil tussen de netten C en D-E is dat het volume in de eerste groter is en daardoor de opwarming langer duurt. Dat kan net voldoende zijn om aan de temperatuureis te blijven voldoen, ook al is de verblijftijd in C langer dan in D-E (scenario zomer 3/4). Dat betekent dat bij een grotere diameter de thermische eigenschappen van het drinkwater ook bijdragen aan de vertraging in de opwarming.

Met de toekomstige klimaatverandering wordt een maximum van 28 graden verwacht op 1 m diepte bij zand en verharding (Vloerbergh et al., 2013). Het is dan belangrijk ook aandacht te besteden aan het secundaire net. Wanneer het drinkwater in het secundaire net al opgewarmd is tot 28 graden zal het drinkwater in het tertiaire net niet afkoelen.

## 3 Benodigde thermische isolatie door bodem en bodembedekking

### 3.1 Aanpak

Uitgangspunt is dat het secundaire net op 1 meter diep ligt, en het TNT op 60 cm diep. Dat betekent als uitgangspunt dat de temperatuur van het drinkwater aan het begin van het tertiaire net gelijk is aan de bodemtemperatuur op 1 meter diepte. Uit de berekeningen van § 2.6 blijkt dat bij de huidige leidingmaterialen de temperaturen aan de tap voor de meeste klanten gelijk is aan de temperatuur van de bodem op de diepte van het TNT. Door, in plaats van de thermische isolatie van de leidingen aan te passen, de thermische isolatie van de bodem (ander materiaal) en bodembedekking (albedo, en verdamping) aan te passen kan gezorgd worden dat de temperatuur van het drinkwater dat bij de knopen (met verbruik groter dan 0) aankomt binnen de eisen blijft: in de zomer lager dan 25 °C, en in de winter hoger dan 0 °C.

De opwarming van de bodem wordt berekend met het bodemtemperatuurmodel (BTM), zie bijv. (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2013a). De verwachting is dat het BTM ook toepasbaar is voor de berekening van vorstindringing, zolang er niet teveel vocht in de bodem zit. In zandgronden vormt dit geen probleem, in klei en veengronden is meer vocht aanwezig. De thermofysische eigenschappen (geleidingscoëfficiënt en warmtecapaciteit) zouden aangepast moeten worden, door ze afhankelijk te maken van het vocht/ijs gehalte. Ijs geleidt warmte immers anders dan water. Tevens treden bij faseovergangen (bevriezen en dooien) energiestromen op, die niet in het BTM zijn verwerkt. Het model zal hierdoor bij de aanwezigheid van veel water afwijken van de werkelijkheid. Het BTM kan dus slechts gebruikt worden als indicatie van vorstindringing.

**Voor de zomerse scenario's wordt het bodemtemperatuurmodel (BTM) gebruikt (§ 3.2); voor de winterse scenario's wordt gerekend met het wintergetal om de vorstindringing te bepalen (hoofdstuk 4).**

### 3.2 Opwarming van de bodem

#### 3.2.1 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. Met het BTM kan op elke locatie de bodemtemperatuur op elke willekeurige diepte berekend worden (Blokker and Pieterse-Quirijns, 2013b). De invoer die het BTM 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.

In dit hoofdstuk kijken we naar de invloed van bodem en bodembedekking: dat wil zeggen de grondsoort, aanwezigheid van vegetatie, invloed van de albedo. Scenariostudies zijn ontwikkeld om de effectiviteit van deze maatregelen te onderzoeken. In Tabel 3-1 zijn de **scenario's weergegeven naast de uitgangssituatie voor het BTM. Er wordt uitgegaan van "platteland", omdat het model waarin ook het stadseffect (Urban Heat Island) kan worden meegenomen nog niet beschikbaar is.**

Voor elk scenario wordt op de diepte van 0,6 m de temperatuur van de bodem berekend met het BTM. Op basis van het verschil in temperatuur, met name op de warmste momenten kan een indruk gekregen worden wat de effectiviteit van elke maatregel is.

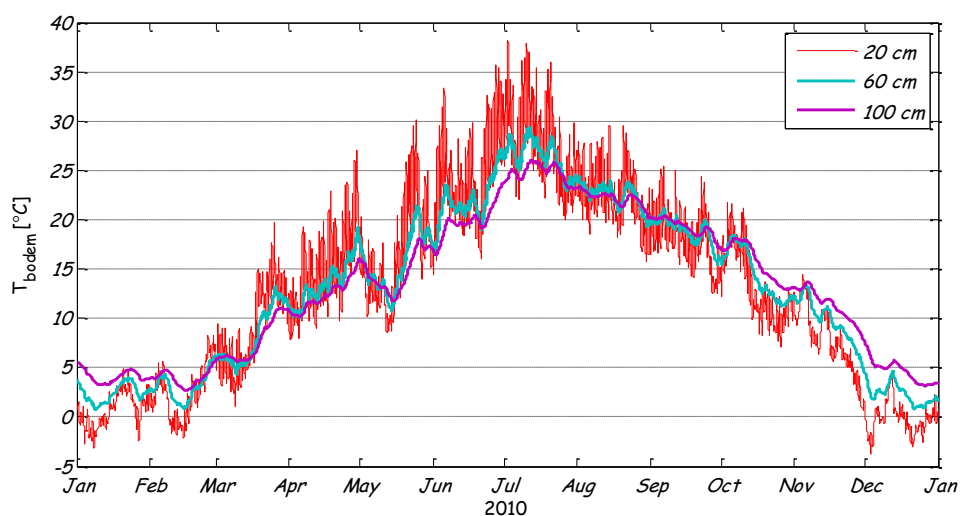
**Tabel 3-1** *Overzicht scenario's voor het BTM gericht op het beïnvloeden van de opwarming van de bodem door het aanpassen van de ontwerpeisen.*

Invoerparameters BTM	Uitgangssituatie	Scenario's
Weersomstandigheden	Weerdata Eindhoven 2008 - 2013	
Locatie leiding	Platteland	
Diepteligging leiding	0,6 meter	
Afdekking (albedo)	stoep (0,13)	0,1 (rood steen) - 0,4 (licht beton)
Bodemsoort	Zand	variaties zand - veen - klei
Vegetatie	0 %	0 - 100%

### 3.2.2 De bodemtemperatuur in de uitgangssituatie van het BTM

In de uitgangssituatie wordt de bodemtemperatuur berekend in een plattelandsomgeving (dat wil zeggen dat het zogenaamde Urban Heat Island effect niet wordt meegenomen), onder een stoep, in een zandbodem, op 0,6 meter diepte in de afgelopen 5 jaar. De weersgegevens behorend bij dit klimaatscenario zijn de data van Eindhoven, beschikbaar bij het KNMI.

De bodemtemperatuur op verschillende diepten in 2010 (warme zomer) is te zien in Figuur 3-1. De bijbehorende kenmerken, namelijk het aantal dagen (in 2008 - 2013) dat de temperatuur boven een bepaalde waarde komt en de maximale temperatuur op de diepte van 0,6 m is weergegeven in Tabel 3-2. In de uitgangssituatie is op de huidige diepteligging van de leidingen de temperatuur maximaal 28,8 °C (op 0,6 m is dat 31 °C). De temperatuur zal ongeveer 13 dagen per jaar gemiddeld boven de 25 °C liggen (op 0,6 m is dat 64 dagen).



**Figuur 3-1** *De voorspelde bodemtemperatuur op verschillende dieptes in Eindhoven, 2010, volgens het BTM.*

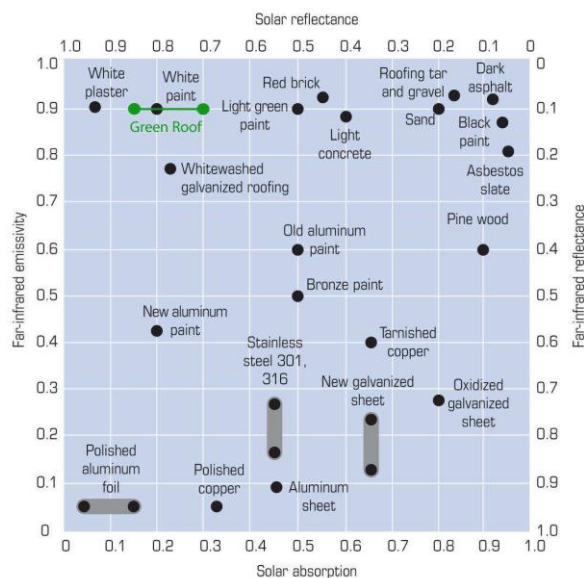
**Tabel 3-2 Het aantal dagen tussen 2008 en 2013 dat de bodemtemperatuur op 0,6 m diepte boven verschillende temperaturen (grenswaarden) komt en de maximale temperatuur volgens het BTM in zand, met weerdata van Eindhoven.**

grenswaarde temperatuur	aantal dagen boven temperatuur
> 20 °C	527
> 22,5 °C	258
> 25 °C	64
> 27,5 °C	12
> 30 °C	0
maximale temperatuur [°C]	31

### 3.2.3 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 (Molen et al., 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 3-2 is de absorptie weergegeven voor verschillende bouwmaterialen, waarbij albedo = 1-absorptie (Hoffman, 2006). Uit de figuur blijkt dat de albedo van verschillende materialen kan variëren tussen ongeveer 0,05 en 0,93. Materialen met een albedo > 0,4 zullen niet in de praktijk toegepast 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.

De scenario's die doorgerekend worden zijn: albedo is 0,10 tot 0,40.



**Figuur 3-2 Absorptie en emissie van bouwmaterialen uit Hoffmann (2006), met albedo = 1-absorptie.**

### 3.2.4 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 ten slotte 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 and Pieterse-Quirijns, 2013b). In Tabel 3-3 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:

$\alpha$	= thermische diffusiviteit	[m <sup>2</sup> /s]
$\lambda$	= warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m.K]
$\rho$	= dichtheid	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	= warmtecapaciteit	[J/kg.K]

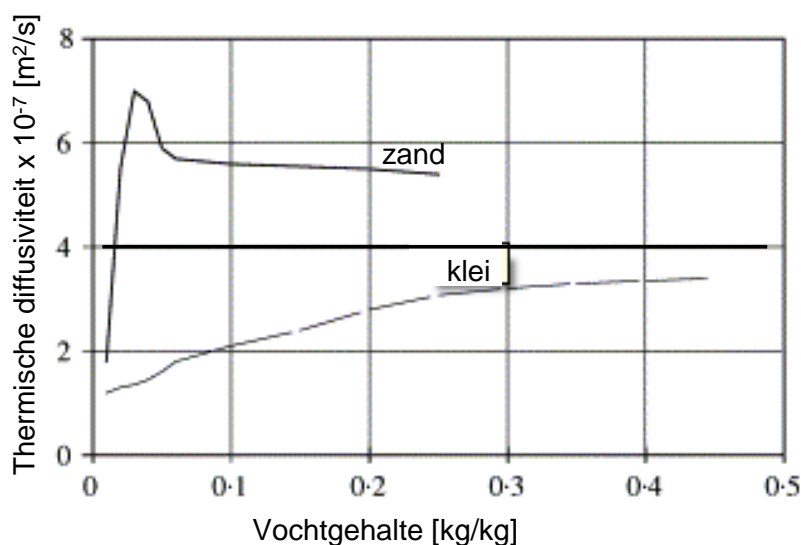
Tabel 3-3 Thermische eigenschappen van verschillende grondsoorten: zand, klei en veen.

Thermische eigenschap			Bodemtype		
			zand	klei	Veen
$\lambda$	warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m.K]	2,03	0,85	0,4
$\rho$	dichtheid	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,60·10 <sup>3</sup>	1,60·10 <sup>3</sup>	1,12·10 <sup>3</sup>
$C_p$	warmtecapaciteit	[J/kg.K]	1,06·10 <sup>3</sup>	1,40·10 <sup>3</sup>	2,68·10 <sup>3</sup>
$\alpha$	thermische diffusiviteit	[m <sup>2</sup> /s]	12,0·10 <sup>-7</sup>	3,79·10 <sup>-7</sup>	1,33·10 <sup>-7</sup>

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 3-3). De thermische diffusiviteit van veen ligt dichtbij die van water, dat een thermische diffusiviteit heeft van  $\alpha_{\text{water}} = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^2/\text{s]}$ , omdat in veen veel water aanwezig is.

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 3-3 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 3-3. Thermische diffusiviteit van zand en klei bij verschillende vochtgehaltes (uit Abu-Hamdeh (2003)).

In het geval leidingen op 0,6 m diepte liggen is het gewenst om een bodemsoort te hebben die langzaam van temperatuur verandert, dus met een lage waarden van de thermische diffusiviteit. Het is niet realistisch om een waarde van de thermische diffusiviteit te nemen die kleiner is dan die van water. In de praktijk komen mengsels van zand, klei en veen voor. In de stedelijke omgeving wordt over het algemeen zand gebruikt onder bestrating, daar liggen dus ook de leidingen in. In Brabant is de natuurlijke ondergrond over het algemeen zand, ook klei komt voor, maar veen is zeldzaam.

De scenario's die doorgerekend worden zijn: zand en klei als de meeste extreme scenario's die in de praktijk voorkomen.

### 3.2.5 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 BTM uitgebreid met het verlies van energie door verdamping (Molen et al., 2008) en wordt de albedo aangepast. De bodemtemperatuur in aanwezigheid van begroeiing/vegetatie wordt vergeleken met de uitgangssituatie (geen vegetatie).

De scenario's die doorgerekend worden zijn: wel vegetatie en geen vegetatie.

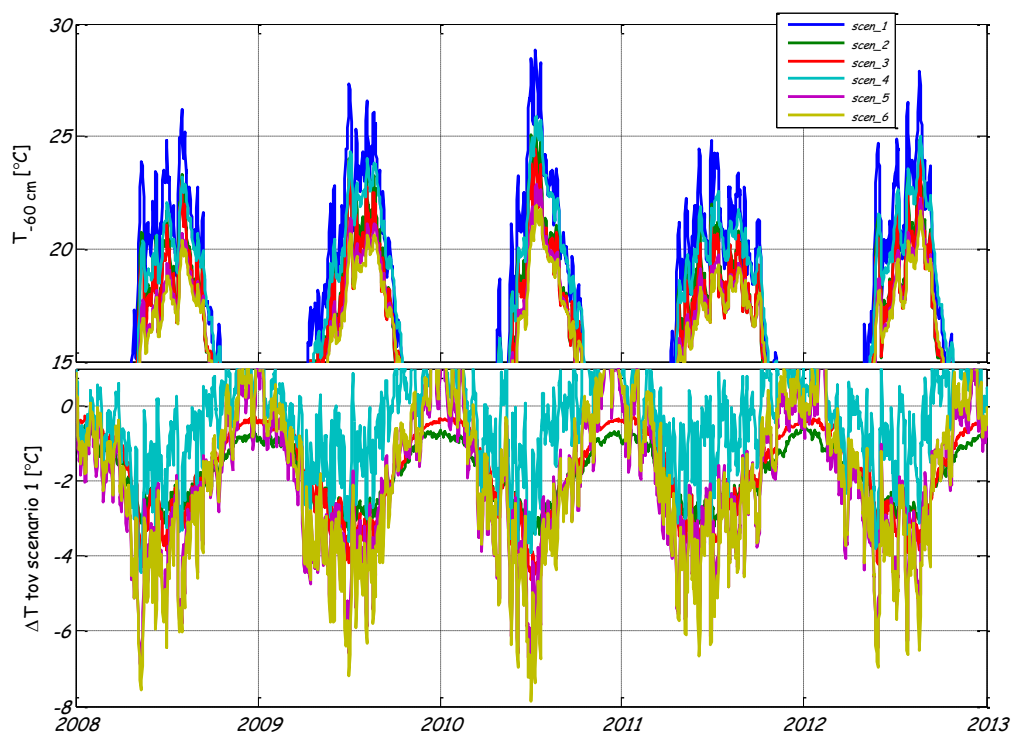
### 3.2.6 Resultaten BTM

De scenario's zijn gecombineerd in een realistische samenhang en met als doel om zoveel mogelijk effect te hebben op de opwarming op 0,6 m diepte (Tabel 3-4). Figuur 3-4 laat zien dat de toepassing van begroeiing leidt tot een lagere bodemtemperatuur in de zomer, en ook toepassing van een hoge albedo heeft ook al een groot effect. Het verschil tussen klei en zand is wat minder groot. Op de dag met de hoogste bodemtemperatuur bij scenario 1

(11 juli 2010, 28,9 °C), geven scenario's 2-6 respectievelijk een verlaging van 3,4; 4,5; 3,0; 6,0 en 7,0 °C.

Tabel 3-4. Scenario's voor het bodemtemperatuurmodel.

scenario	albedo	grondsoort	vegetatie	opmerking
1	0,1	zand	geen	rode stenen
2	0,4	zand	geen	licht beton
3	0,19	zand	wel	struiken
4	0,1	klei	geen	"grondverbetering"
5	0,4	klei	geen	"grondverbetering" + licht beton
6	0,19	klei	wel	"grondverbetering" + struiken



Figuur 3-4. Resultaten van de verschillende scenario's in het bodemtemperatuurmodel op 60 cm diepte a) temperatuur en b) temperatuurverschil ten opzichte van scenario 1.

### 3.3 Discussie en conclusies

In zandgronden met een verhard oppervlak van rode klinkers stijgt vrijwel iedere zomer de bodemtemperatuur op 60 cm diepte boven de 25 °C uit. In een stedelijke omgeving, en in de toekomst onder invloed van klimaatverandering zal dit niet minder vaak gebeuren. Wanneer het TNT op 60 cm diepte wordt gelegd zijn er verschillende mogelijkheden om te zorgen dat de stijging van de bodemtemperatuur rond de leidingen beperkt wordt. Het meest effectief is het planten van struiken, in plaats van de leiding onder klinkers te leggen. Ook het gebruik van een grondsoort met een kleinere thermische diffusiviteit zoals klei of veen zorgt voor een vertraging in de opwarming en daarmee een beperking van het optreden van hoge temperaturen.

Voor het TNT geldt bij Brabant Water dat het vooral in een stedelijke omgeving zal worden toegepast onder voet- of fietspaden die met tegels of klinkers bedekt zijn, zodat de leidingen makkelijk bereikt kunnen worden. Dit betekent ten hoogste scenario 2 (zand en lichte tegels met hogere albedo) of wellicht scenario 4 (klei in plaats van zand op de leiding storten, wel met rode klinkers) of scenario 5 (klei in plaats van zand op de leiding storten, bedekt met lichte tegels) uit Tabel 3-4. **Deze scenario's leiden tot ca. 3,0 °C tot maximaal 6,0 °C verlaging in de zomer op 60 cm diepte.** Het maximum dat dan in 2010 bereikt wordt is 21-24 °C zodat de temperatuur van het drinkwater ook onder de 25 °C zal blijven.

Met de toekomstige klimaatverandering wordt een maximum van 31 graden verwacht op 60 cm diepte bij zand en verharding. Ook met de acties om de opwarming van de bodemtemperatuur te beperken zal dan de temperatuur nog af en toe boven de 25 °C komen. De isolatie moet derhalve ook gezocht worden in het leidingmateriaal.

## 4 Vorstindringing

### 4.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is gekeken naar de benodigde thermische isolatie tegen het bevriezen van het drinkwater in de leidingen. Daarnaast heeft bevroren (boven)grond ook mogelijk een impact op de belasting van leidingen.

Informatie en theorieën over het effect van vorst op infrastructuur komt voornamelijk uit de hoek van funderingen (Farrington and Gildea, 2005; Figley and Snodgrass, 1984). De ligging van funderingen van staalgefundeerde projecten (dus niet bij funderingen op palen) is gebaseerd op vorstindringing. Bij een wisselende vorstindringing zal de fundering omhoog geduwd worden. Funderingen worden daarom onder de vorstgrens aangelegd. Ook voor de aanleg van trottoir of bestrating bestaan ontwerpcriteria gebaseerd op de maximale vorstindringdiepte (Farrington and Gildea, 2005). In eerste instantie dacht men dat het rijzen van de bodem onder invloed van vorst het gevolg was van het uitzetten van water door bevriezing. De huidige theorie is dat de groei van ijskristallen zorgt voor een migratie van water uit de bodem, waardoor zogenaamde ijslenzen zich ontwikkelen. Als vorst de bodem indringt, bevriest het aanwezige water. Hierdoor beweegt water uit de onbevroren grond naar het vriesfront (vergelijkbaar met drogen). Deze watermoleculen, zorgen voor de aangroei van ijskristallen, als ze het vriesfront bereiken, waardoor een ijslens ontstaat en aangroeit. Het rijzen van de grond en de resulterende verplaatsing van grond kan leiden tot aanzienlijke schade. De werkelijke verticale verplaatsing is veel groter dan de uitzetting die plaatsvindt als water bevriest (Farrington and Gildea, 2005; Penner, 1962). Fijne (fijne zanden) en zeer fijne (klei, leem) gronden zijn zeer tot matig vorstgevoelig voor rijzen. Grovere gronden (middelmatig, grof zand) zijn over het algemeen niet gevoelig hiervoor ([www.waterloketvlaanderen.be](http://www.waterloketvlaanderen.be); Burn 1976).

De invloedsfactor vorstindringing heeft betrekking op de mogelijkheid dat een leiding bevriest omdat deze niet meer in een vorstvrije grond ligt. Door vorst treedt ook werking van de bodem op. Door het optreden van vorst en dooi vinden er bewegingen in de grond plaats die kunnen leiden tot een verhoogde storingskans. Vorstschade aan leidingen vindt niet alleen plaats als de vorst echt tot de diepte waarin de leidingen zich bevinden doordringt, maar ook door werking van de bodem bij vorst en dooi boven de leiding. Bij de keuze voor de diepteligging van drinkwaterleidingen speelt vooral het indringen van vorst in de bodem een rol en niet zozeer de vorming van ijslenzen. In Nederland, en ook in met name landen waar het erg koud kan worden zoals Canada en de Scandinavische landen is de diepteligging van drinkwaterleidingen gebaseerd op (praktijk)kennis van vorstindringing.

In dit hoofdstuk proberen we een inschatting te maken van de vorstindringing in de toekomst, op basis van enkele theorieën over de relatie tussen vorstdagen en vorstindringing.

### 4.2 Relatie wintergetal en vorstindringing

Het wintergetal is de som van het totaal aantal vorstdagen in een winter berekend door alle etmaalgemiddelden beneden het vriespunt op te tellen. Deze maat wordt vaak gebruikt om de strengheid van de winter in uit te drukken. Ook in modellen van vorstindringing in de bodem wordt dit getal toegepast. In Tabel 4-2 staan de wintergetallen van de afgelopen eeuw in de Bilt; een wintergetal van boven de 200 is voor Nederland een strenge winter.

De mate waarin vorst de bodem in kan dringen is van een groot aantal factoren afhankelijk. De factoren kunnen in drie algemene categorieën worden gegroepeerd (Farrington and Gildea, 2005; Figley and Snodgrass, 1984; Penner, 1962; Williams and Gold, 1976):

### 1. meteorologische factoren

Meteorologische factoren zijn factoren als luchttemperatuur, straling, neerslag, wind snelheid. Hiervan is luchttemperatuur waarschijnlijk het belangrijkste. De vorstindringdiepte is niet alleen afhankelijk van de luchttemperatuur, maar ook van de lengte van de vorstperiode. Wanneer een periode van neerslag voorafgaat aan de vorst is er een snelle indringing van vorst in de bodem.

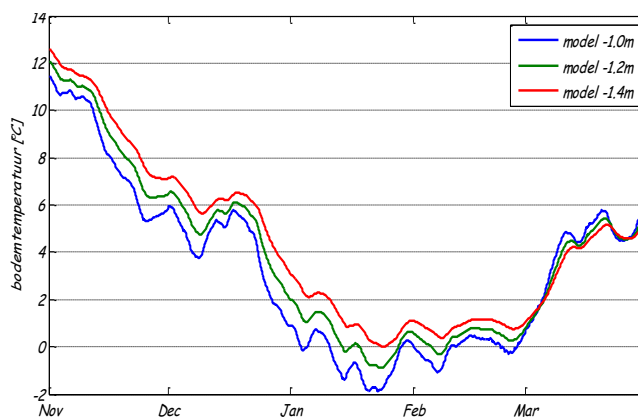
### 2. factoren betreffende het terrein

De bedekking van de bodem, zoals asfalt of vegetatie speelt een rol bij het indringen van vorst in de bodem. Een kale vlakte zonder bedekking heeft een diepe vorstindringing. Een hele belangrijke rol speelt de aanwezigheid van sneeuw. Sneeuw werkt als isolatielaag en voorkomt een snelle indringing.

### 3. bodemeigenschappen

De snelheid van verdere indringing van vorst is afhankelijk van bodemeigenschappen zoals de warmte- capaciteit, de warmtegeleidbaarheid, de latente warmte en het vochtgehalte. In het algemeen ondervinden zand en 'gravel' een diepere vorstindringing dan fijn zand en klei.

Hoewel het BTM niet goed toepasbaar is voor temperaturen onder het vriespunt, is hiermee toch een kleine exercitie gedaan voor de strenge winter van 1963 (wintergetal van 346) in een zandgrond (Figuur 4-1). Zonder rekening te houden met energieverlies door faseovergangen wordt de grens van 0 °C bij ongeveer -1,4 m diepte aangetroffen. Wanneer wel rekening gehouden wordt met faseovergangen zal de indringdiepte minder zijn.

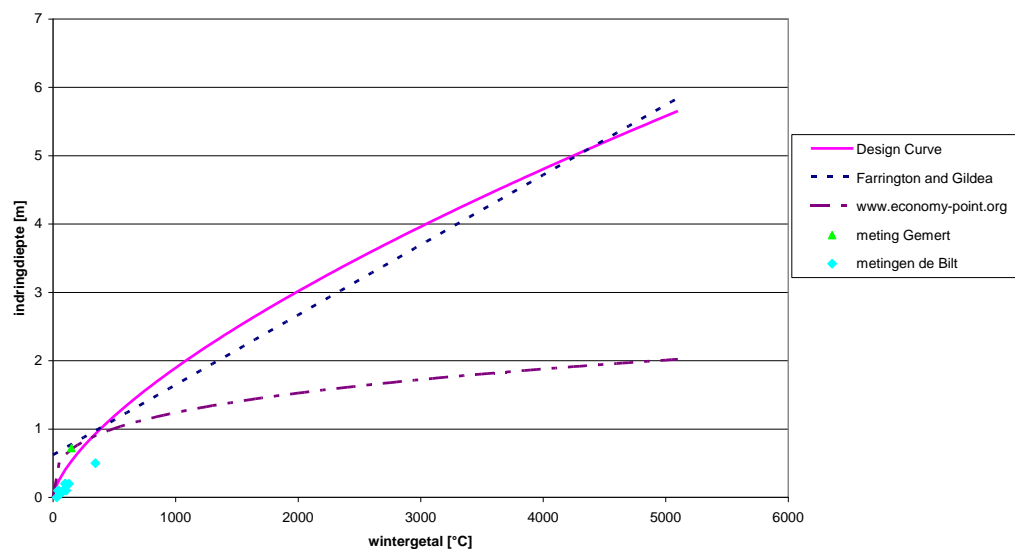


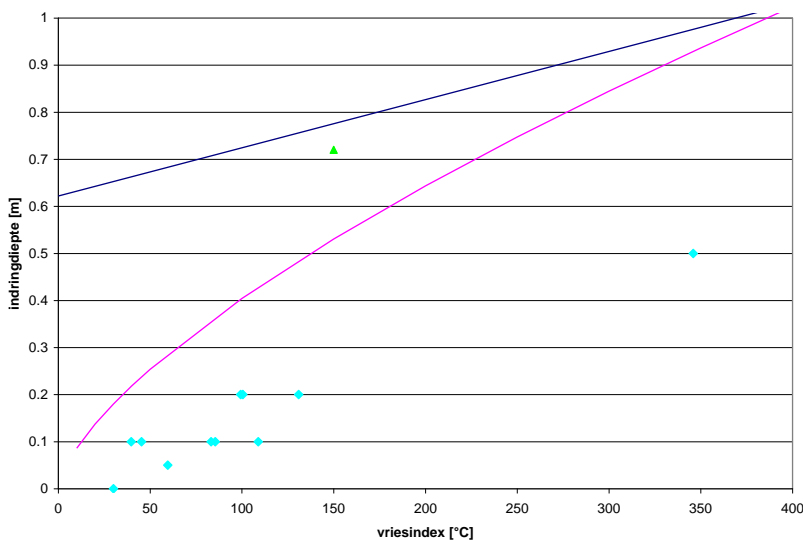
**Figuur 4-1.** De gemodelleerde bodemtemperatuur op verschillende dieptes voor de winter van 1962/63. De temperatuurdata van de Bilt is gebruikt, als bodemsoort is zand toegepast. Het BTM houdt geen rekening met de faseovergang van water naar ijs.

De voorspelling van temperaturen en indringdieptes is complex en veel factoren zijn erbij betrokken. Voorbeelden van gecompliceerde modellen, zoals de gemodificeerde Berggren vergelijking, zijn o.a. beschreven door Rajani en Zhan (1996) en Andersland en Ladanyi (1994). Door de aanzienlijke schade die vorstindringing kan aanrichten aan funderingen is binnen dit onderzoeksgebied een aantal eenvoudige relaties opgesteld voor het voorspellen van de vorstindringdiepte als functie van het zogenaamde wintergetal. Er bestaat een fysische basis voor deze benaderingen. Immers, de luchttemperatuur beïnvloedt significant

de grensconditie voor warmtetransport aan het oppervlak van de bodem. Echter, de luchttemperatuur is niet de enige factor. Door de complexe verschijnselen tijdens het vriezen is de voorspelling op basis van het wintergetal alleen zelden een voldoende en betrouwbare voorspelling. Een lokatiespecifieke relatie met het wintergetal, gebaseerd op lokale weergegevens, bodemeigenschappen en vochtcondities is bruikbaar. De meest verfijnde modellen bevatten ook deze informatie. De geschikte mate van verfijning is afhankelijk van de gewenste toepassing en de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van de relevante invoergegevens (Farrington and Gildea, 2005; Figley and Snodgrass, 1984). In gebieden waar deze gegevens voor vorstindringing niet beschikbaar zijn, zijn de relaties met het wintergetal een bruikbare richtlijn (Penner, 1962). In Tabel 4-1 zijn drie relaties weergegeven die in de literatuur aanwezig zijn voor het verband tussen de maximale vorstindringdiepte in cm en het wintergetal  $H$ . De condities waarbij de relaties zijn opgesteld zijn tevens in de tabel opgenomen.

Voor de Nederlandse condities zijn invoergegevens voor de complexere modellen niet beschikbaar. De eenvoudige relaties worden daarom toegepast als richtlijn. In Figuur 4-2 zijn de drie verschillende relaties weergegeven. In een KNMI rapport zijn bodemtemperaturen opgenomen voor de periode 1962-1973 (van der Hoeven and Lablans, 1992). Deze data zijn gebruikt om de maximale indringdiepte als functie van het wintergetal te bepalen voor de Nederlandse situatie. De data zijn ook weergegeven in Figuur 4-2. Daarnaast is bij een grafdelver in Gemert bekend dat de maximale indringdiepte in de jaren '90 0,72 m bedroeg (van der Burgt, 2010). Dit punt is ook in de figuur te zien. In Tabel 4-2 zijn de wintergetallen gegeven voor de Bilt in de afgelopen 112 jaar. De strengste winter had een wintergetal van 346 (1963). Volgens Figuur 4-2 hoort hierbij een maximale indringdiepte 0,90-0,98 m, dat overeenkomt met de huidige richtlijn van 1 meter. Uit de meetgegevens in Figuur 4-2 blijkt dat de relaties de gemeten indringdiepte niet precies voorspellen, maar wel in dezelfde orde grootte zitten. Uit de figuur blijkt dat de Design Curve het dichtst ligt bij de gemeten KNMI data.





Figuur 4-2. De maximale vorstindringdiepte in [m] als functie van het wintergetal in [°C], voorspeld door de drie relaties weergegeven in Tabel 4-1 en gebaseerd op enkele beschikbare Nederlandse meetgegevens. De onderste figuur is een ingezoomde versie. Bron: (Pieterse-Quirijns et al., 2011)

Tabel 4-1. Eenvoudige relaties die de maximale vorstindringdiepte (x in cm) relateren aan het wintergetal (H in °C).

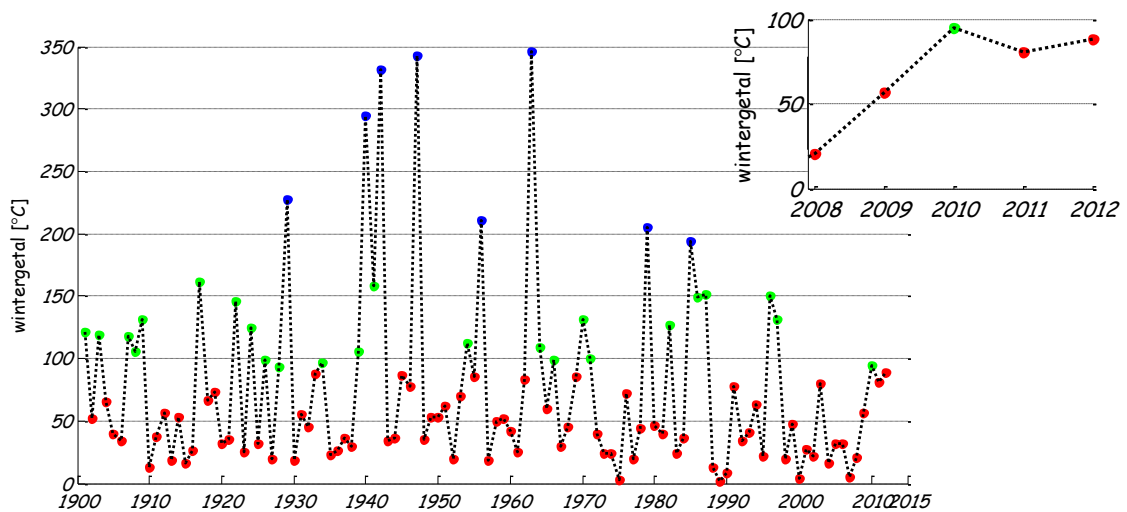
condities voor relatie	relatie x = f(H)	relatie H = f(x)	referentie
<p><b>relatie 1:</b> zogenaamde <i>Design Curve</i>: 'under snow cleared airport runways in northern US and is based on a granular soil type and limited range of FI'</p>	$x = 100 \cdot 10^{0.671 \log(H) - 1.7355}$	$H = 10^{\frac{\log(x/100) + 1.7355}{0.671}}$	afgeleid uit (Figley and Snodgrass, 1984) en (Burn, 1976). Relatie geldig tot H = 2500°C
<p><b>relatie 2:</b> De relatie is gebaseerd op data van 40 jaar. Zandbodem, met asfalt bedekt en 'crushed stone' ondergrond. De relatie is gevalideerd met vooral hoge wintergetallen (450 tot 1200 °C). Opgesteld voor Vermont.</p>	$x = 62.2 + 0.1024 \cdot H$	$H = \frac{x - 62.2}{0.1024}$	(Farrington and Gildea, 2005)
<p><b>relatie 3:</b> 'centralstrict cooling periods'</p>	$x = 15.6 \cdot (H)^{0.3}$	$H = 10^{\frac{\log(x/15.6)}{0.3}}$	<a href="http://www.economy-point.org">www.economy-point.org</a>



Tabel 4-2. Wintergetallen volgens HELLMANN voor De Bilt (nov t/m maart) winters 1900/01 t/m 2012/2013 (<http://www.knmi.nl/klimatologie/lijsten/hellmann.html>).

Jaar	Getal	Jaar	Getal	Jaar	Getal	Jaar	Getal
1901	121,4	1929	227,1	1957	18,9	1985	193,6
1902	51,8	1930	18,4	1958	49,7	1986	149,3
1903	119,1	1931	55,3	1959	52,1	1987	151,5
1904	65,6	1932	44,8	1960	42,4	1988	13
1905	39,2	1933	87,6	1961	24,9	1989	1,9
1906	33,6	1934	97	1962	83,2	1990	8,4
1907	118,4	1935	22,9	1963	345,9	1991	77,3
1908	105,5	1936	26,7	1964	108,9	1992	33,6
1909	131,9	1937	35,8	1965	59,6	1993	41,2
1910	12,8	1938	29,5	1966	99,3	1994	62,8
1911	38	1939	106	1967	30	1995	21,8
1912	56,9	1940	294,6	1968	45,3	1996	150,5
1913	17,9	1941	158,1	1969	85,5	1997	131,6
1914	53,3	1942	331,8	1970	130,9	1998	19,3
1915	16,6	1943	34,3	1971	100,5	1999	47,7
1916	26	1944	35,9	1972	39,7	2000	3,6
1917	162,1	1945	86,3	1973	23,8	2001	27,7
1918	66,7	1946	77,4	1974	24,3	2002	21,6
1919	73,4	1947	342,8	1975	3,2	2003	80,1
1920	32,3	1948	35,2	1976	72,6	2004	16,3
1921	34,8	1949	53,6	1977	19,1	2005	32,4
1922	145,7	1950	53	1978	44,4	2006	31,5
1923	25,3	1951	62,1	1979	205,7	2007	4,8
1924	125,1	1952	20,1	1980	46,7	2008	20,3
1925	32,2	1953	69,5	1981	39,9	2009	56,5
1926	99,4	1954	112,8	1982	127,1	2010	94,7
1927	19,3	1955	85,2	1983	23,9	2011	80,6
1928	93,5	1956	210,7	1984	36,4	2012	88,4

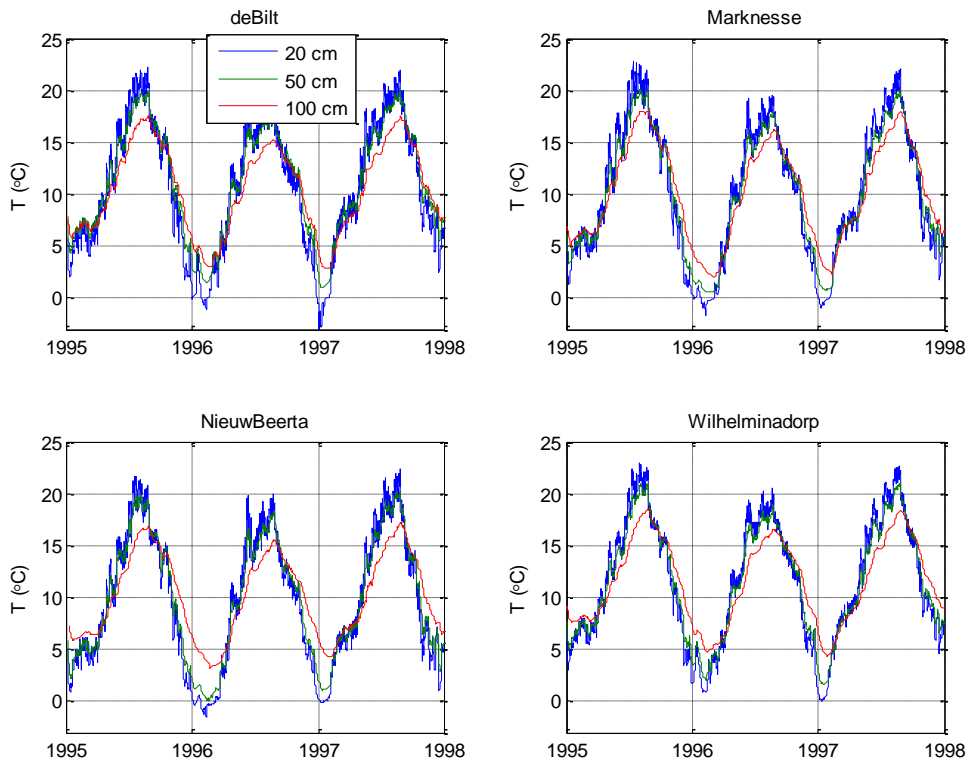
Bij 60 cm diepte kan een wintergetal worden berekend van 180 (relatie 1) of 90 (relatie 3) of zelfs 0 (relatie 2). Sinds 1900 is het wintergetal 180 8 maal (7%) en het wintergetal 90 32 maal (29%) overschreden. Het wintergetal 180 lijkt iets van het verleden, maar het getal 90 is ook in de laatste jaren overschreden (Tabel 4-2, Figuur 4-3).



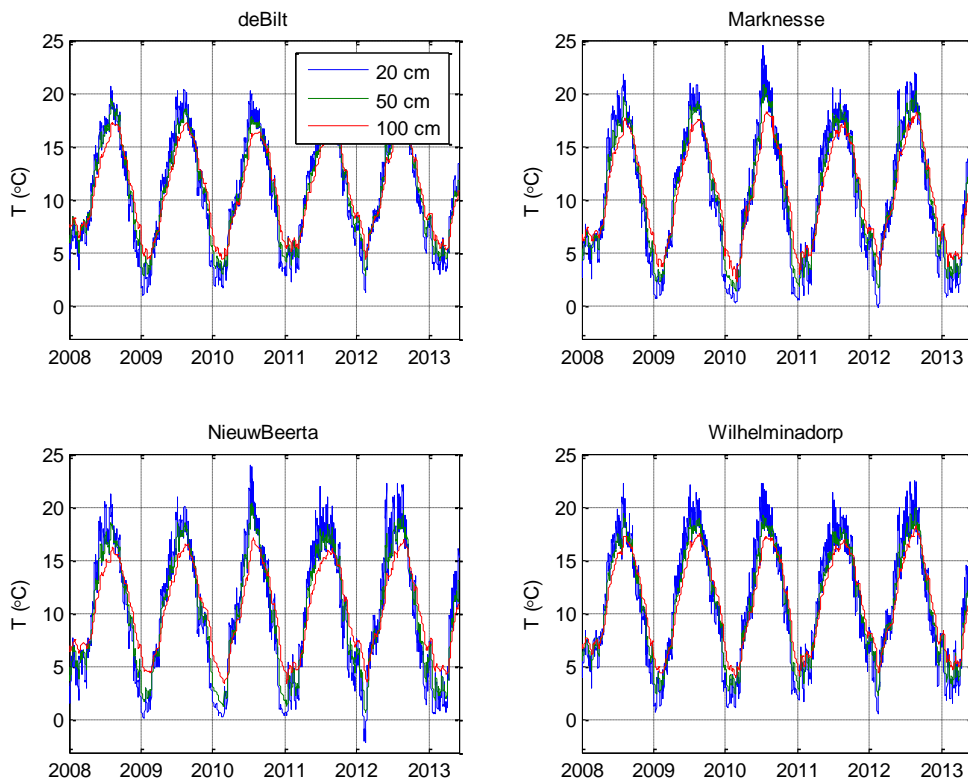
Figuur 4-3. Wintergetal in de Bilt (Tabel 4-2) met in blauw de getallen  $> 180$  °C en in groen de getallen  $> 90$  °C. Rechtsboven is ingezoomd op de laatste 5 jaar.

### 4.3 Historische gegevens vorstindringing

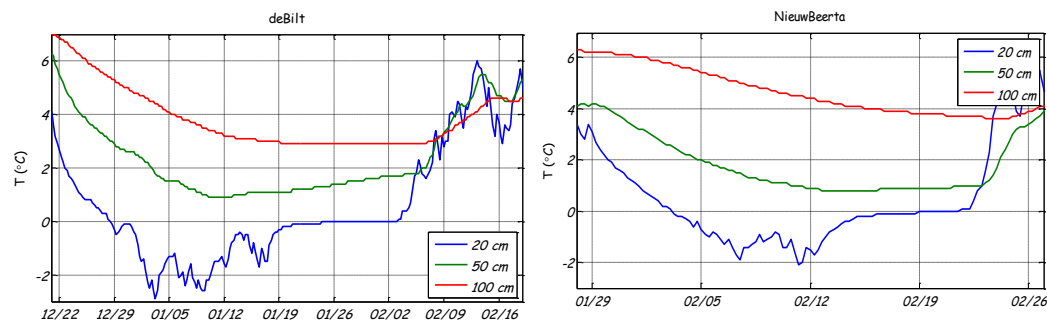
De vorstindringing is afhankelijk van de grondsoort, de aanwezigheid van grondwater en de ligging in stad of platteland. Er blijkt dat er te weinig gegevens bekend zijn over de relaties tussen vorstindringing en wintergetal voor de Nederlandse situatie om al deze invloedsfactoren te kunnen doorrekenen. Het KNMI meet sinds 1995 op vier weerstations op 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm en 1 m diepte de bodemtemperatuur. Daarom is bij het KNMI de data opgevraagd van de bodemtemperatuur op deze locaties in de (sinds 1995) strenge winter van 1996/1997 en de laatste 5 jaar. Figuur 4-4 en Figuur 4-5 laten zien dat de winter van 1996/97 in de Bilt en 2011/2012 in Nieuw Beerta de koudste waren. Figuur 4-6 zoomt in op deze winters. Op 20 cm diepte wordt wel vorst aangetroffen, maar op 50 en 100 cm diepte niet. Uit deze data kan worden geconstateerd dat de vorstindringing tussen de 20 en 40 cm is voor de laatste 18 jaar. Met een wintergetal van 100-150 (Tabel 4-2, Figuur 4-3) sluit dit ook weer redelijk aan bij de Design Curve (Tabel 4-1, Figuur 4-2).



Figuur 4-4. Bodemtemperatuur 1995-1997 op vier locaties in Nederland (bron: KNMI).



Figuur 4-5. Bodemtemperatuur 2008-mei 2013 op vier locaties in Nederland (bron: KNMI).



Figuur 4-6. Bodemtemperatuur in de Bilt in de winter 1996/1997 en Nieuw Beerta in 2012.

#### 4.4 Vorschade bij Brabant Water

De kans op breuk bij PVC-leidingen neemt toe bij temperaturen onder het vriespunt (Vewin, 2004). Kunststoffen worden brosser bij lage temperaturen en kunnen daardoor minder puntbelastingen aan. Bovendien zal de uitzetting van ijs (ten opzichte van vloeibaar water) een grote interne druk veroorzaken die de leiding niet aankan. In het TNT zal mogelijk gewerkt worden met kunststofleidingen. In USTORE is het niet zo makkelijk om vorstschade aan leidingen te analyseren; lage temperaturen leiden bij gietijzer wel tot meer schade. Om toch een beeld te krijgen van vorstschade is informatie opgevraagd van Brabant Water.

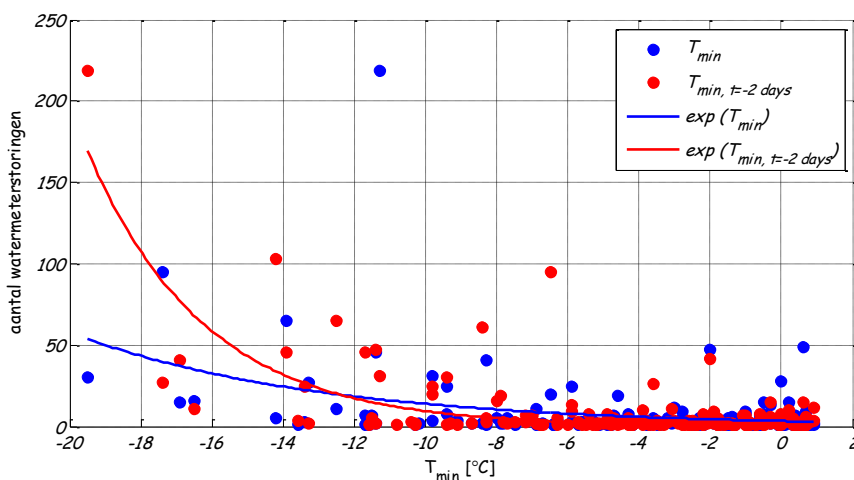
Aansluitleidingen liggen minder diep dan de distributieleidingen. Een dienstleiding gaat van 1 meter diepte naar de woning en dichterbij de meteropstelling wordt de diepteligging kleiner. Een minder strenge winter kan dan toch een vorstprobleem opleveren. Afgelopen jaren was het wintergetal ongeveer 90. Leidingen die hoger liggen dan 0,4 m – 0,6 m kunnen dan bevriezen. Brabant water heeft storingen door vorstschade geconstateerd (Tabel 4-3).

**Ook buiten het vorstseizoen zijn 'bevoren watermeters' gerapporteerd. De mensen uit de regio's constateren dat met name bij tijdelijke voorziening (zomerhuisjes, terreinaansluitingen e.d.) men er veelal pas later in het seizoen achter komt dat de watermeter kapot gevoren is (een bevoren watermeter is relatief eenvoudig te herkennen door het breukpatroon van het glas). Bij dit type aansluiting is de watertoevoer bij de stopkraan afgesloten, er is dus geen directe lekkage dat het zichtbaar maakte.**

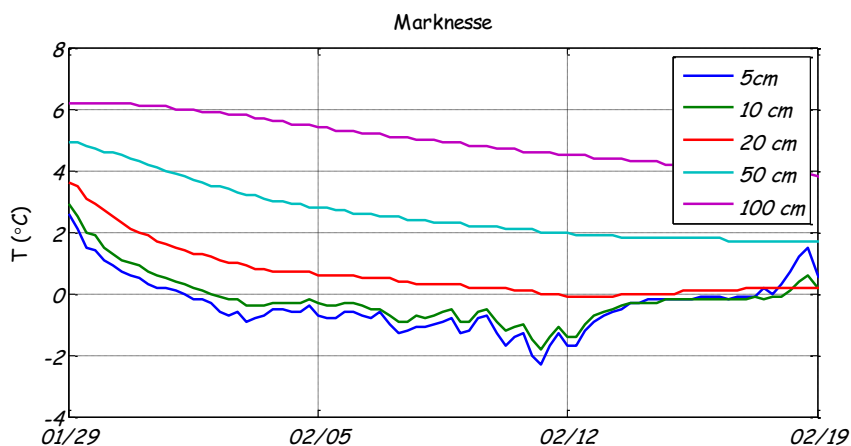
Hoewel het wintergetal van 2011/2012 vergelijkbaar is met dat van 2010/2011 en 2012/2013 is het aantal vorstschades in 2011/2012 veel hoger. In 2012 heeft Brabant Water een 'crisiscentrum' ingericht in het weekend om de veelvoud aan telefoontjes te kunnen verwerken in verband met de plotselinge zeer strenge vorst aan het begin van de winter (29 jan - 13 feb). Kennelijk is niet alleen het aantal vorstdagen, maar ook de mate van vorst van belang. Figuur 4-7 laat het aantal watermeterstoringen zien in relatie tot de temperatuur op de meldingsdatum en twee dagen voor de meldingsdatum. De temperaturen boven 1 °C zijn buiten beschouwing gelaten, omdat de melding waarschijnlijk pas veel later was dan de eigenlijke storing. De figuur laat zien dat de bij een lagere temperatuur er inderdaad meer storingen optreden, met een vertraging van ca. 2 dagen. Die vertraging van 2 dagen is ook geconstateerd voor aansluitleidingen, hoofdkranen en binneninstallatie. De vertraging van 2 dagen kan te maken hebben met de tijd tussen storing en melding of met de tijd tussen lage buitentemperatuur en bevrozing van de appendages of leidingen. De data uit Figuur 4-8 laat zien dat er een vertraging van enkele dagen is tussen de temperatuur op 5 cm diepte en 20 cm diepte tijdens de daling tot 1 en 0 °C.

Tabel 4-3. Aantal storingen met oorzaak vorst/bevriezing volgens SAP. Overig: onbekend, afsluiter, distributieleiding, brandkraan. Wintergetal uit Tabel 4-2.

	Aansluit- leiding	Binnen- installatie	Hoofd- kraan	Water- meter	Overig	Winter- getal
jan '08 – okt '08	5	2	3	44	1	4,8
nov '08 – okt '09	25	50	17	775	11	20,3
nov '09 – okt '10	5	20	5	256	3	56,5
nov '10 – okt '11	5	11	4	172	1	94,7
nov '11 – okt '12	38	121	17	893	24	80,6
nov '12 – mrt '13	6	0	0	77	1	88,4



Figuur 4-7. Aantal bevroren watermeters afhankelijk van de minimum buitentemperatuur op de meldingsdatum (blauw) en 2 dagen voor de meldingsdatum (rood). Temperaturen > 1 °C zijn buiten beschouwing gelaten. De R<sup>2</sup> van de gefitte exponentiële functies is 0,13 en 0,57 voor respectievelijk de blauwe en rode punten.



Figuur 4-8. Bodemtemperatuur op verschillende dieptes tijdens vorstperiode in 2012.

#### 4.5 Discussie en conclusies

Naast hoge temperaturen in de zomer is ook het optreden van bevriezing van de ondergrond in de winter een potentieel probleem voor leidingen op 60 cm diepte. Op basis van de

gerapporteerde vorstschade lijkt niet alleen het aantal dagen vorst (uitgedrukt in het wintergetal), maar ook de strengheid van de vorst van belang. Daarbij lijkt niet alleen het bevroren van de leidingen, maar ook vorst boven de leidingen een probleem te geven.

Het is niet eenvoudig te voorspellen hoe vaak bevriezing op 50 - 60 cm diepte op zal treden in Brabant in de komende 40 jaar. Op de vier locaties waar KNMI de bodemtemperatuur meet is sinds 1995 geen vorst op 50 cm diepte gemeten, maar dat geeft geen garantie voor de toekomst. Op basis van het best beschikbare model dat wintergetal en vorstindringing aan elkaar relateert leidt een wintergetal van 180 tot vorst op 60 cm diepte; de overschrijdingsfrequentie van dit wintergetal sinds 1900 is 7%. Eén strenge winter met vorst op 60 cm diepte zal al tot problemen leiden. De kans dat in de komende 100 jaar de vorst zo diep komt is erg groot, ook al is niet bekend wanneer.

## 5 Vereiste materiaaleigenschappen bij 60 cm diepteligging

### 5.1 Voorkomen bevroering leiding

Los van de mechanische consequenties van vorst, wordt hier gekeken naar de thermische isolatie om in geval van een bevroren bodem, bevroering van het water in de leiding te voorkomen. Uit hoofdstuk 2 volgt dat bij een verblijftijd van minder dan 12 uur in het tertiaire net er geen bevroering optreedt als warmteweerstand  $\lambda^*$  minimaal 0,25 bedraagt. De warmteweerstand wordt bepaald door de diameter van de leiding, de wanddikte en  $\lambda$  van het materiaal en het water in de leiding. Uit een berekening van  $\lambda^*$  voor de standaard diameters en wanddikten volgt dat een  $\lambda^*$  van 0,25 haalbaar is voor grotere wanddikten in de kleine diameters in PVC, voor PE is een  $\lambda^*$  van 0,25 niet haalbaar binnen het leveringsprogramma voor deze leidingen ( tabel 5-1).

*Tabel 5-1 Noodzakelijke en beschikbare wanddikten PVC en PE bij een  $\lambda^*$  van 0,25*

Diameter (mm)	$\lambda^*$ gewenst	Benodigde wanddikte (mm)		Beschikbaar		
		PVC $\lambda = 0,16$	PE $\lambda = 0,26$	SDR 14 PVC 1,6 MPa	SDR 21 PVC 1,25 MPa	SDR 11 PE80/PE100 PN12,5/PN16
40	0,25	2,5	<b>3,9*</b>	3,0		3,7
50	0,25	3,1	<b>4,8*</b>	3,7		4,6
63	0,25	<b>3,9*</b>	<b>6,1*</b>		3,0	5,8
75	0,25	<b>4,6*</b>	<b>7,2*</b>		3,6	6,9
90	0,25	<b>5,6*</b>	<b>8,7*</b>		4,3	8,2
110	0,25	<b>6,8*</b>	<b>10,6*</b>		5,3	10,0

\*De cursief en met asterisk weergegeven wanddikten zijn niet beschikbaar

### 5.2 Voorkomen opwarmen van de leiding

De optredende opwarming onder zomerse condities blijft binnen de gestelde randvoorwaarde bij een  $\lambda^*$  van 1, 4, 16 en 64 in de verschillende klimaatscenario's. De vereiste warmteweerstanden worden niet gehaald met standaard wanddiktes voor de materialen PVC en PE, uit tabel 5-1 blijkt een  $\lambda^*$  van 0,25 alleen voor de kleine diameters haalbaar. De noodzakelijke warmteweerstand kan alleen gehaald met een sandwichconstructie voor de buiswand.

Tabel 5-2 geeft de noodzakelijke dikte van de isolatielaag van de leiding om tot de vereiste  $\lambda^*$  te komen. Bij de berekeningen is uitgegaan van een PVC binnenbuis in de klasse 1 MPa en een  $\lambda$  waarde van de isolatie van 0,04 (minerale wol, polyurethaanschuim). De geelgemarkeerde regels zijn situaties waarbij de ontgravingsdiepte zo groot wordt dat op die diepte beter een minder of geen geïsoleerde buis gelegd kan worden (ongeveer 1 meter diepte) of een zeer onwaarschijnlijke isolatiedikte benodigd is.

Tabel 5-2 Buitendiameter, wanddikten en diepteligging bij de verschillende diameters en  $\lambda^*$ 

Diameter vw leiding mm	Wanddikte vw leiding mm	Wanddikte isolatie mm	Buiten diameter mm	$\lambda^*$	Onderkant leiding M
40	1.9	3	46	1.35	0.646
40	1.9	12	64	4.08	0.664
40	1.9	115	270	16.01	0.870
40	1.9	44200	88440	64.01	89.040
50	2.4	3	56	1.13	0.656
50	2.4	15	80	4.09	0.680
50	2.4	144	338	16.04	0.938
50	2.4	55000	110050	64.04	110.650
63	2.4	4	71	1.12	0.671
63	2.4	20	103	4.14	0.703
63	2.4	192	447	16.06	1.047
63	2.4	82000	164063	64.00	164.663
75	2.9	5	85	1.17	0.685
75	2.9	23	121	4.04	0.721
75	2.9	230	535	16.12	1.135
75	2.9	97000	194075	64.03	194.675
90	3.5	5	100	1.01	0.700
90	3.5	28	146	4.09	0.746
90	3.5	275	640	16.11	1.240
90	3.5	116000	232090	64.03	232.690
110	4.2	7	124	1.12	0.724
110	4.2	34	178	4.06	0.778
110	4.2	335	780	16.05	1.380
110	4.2	143000	286110	64.00	286.710

Brabant Water heeft de voorwaarde gesteld dat de extra wanddikte voor de isolatielaag niet meer dan 20 mm mag bedragen. De bijbehorende  $\lambda^*$  is bepaald (tabel 5-3). Het blijkt niet mogelijk om in alle vier klimaatscenario's een realistische leidingconstructie te realiseren.

Tabel 5-3 Berekende waarde  $\lambda^*$  bij maximale extra wanddikte van 20 mm

Diameter vw leiding mm	Wanddikte vw leiding mm	Wanddikte isolatie mm	Buiten diameter mm	$\lambda^*$	Onderkant leiding M
40	1.9	20	80	5.93	0.680
50	2.4	20	90	5.07	0.690
63	2.4	20	103	4.14	0.703
75	2.9	20	115	3.63	0.715
90	3.5	20	130	3.14	0.730
110	4.2	20	150	2.67	0.750



### 5.3 Benodigde sterkte

#### 5.3.1 Algemeen

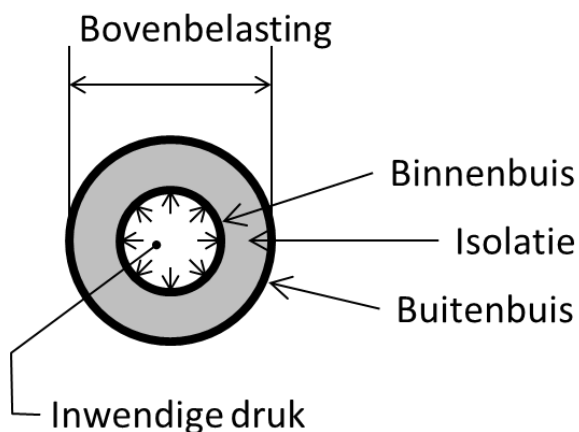
De benodigde sterkte van de buis bestaat uit een benodigde tangentiële sterkte voor het opnemen van de bovenbelasting en de inwendige druk en een longitudinale sterkte voor het opnemen van de belastingen in langsrichting onder andere als gevolg van zettingen.

#### 5.3.2 Tangentiële sterkte

De benodigde tangentiële sterkte wordt bepaald door de interne en externe belastingen (dwars op de buiswand) die in de buisconstructie opgenomen moeten worden. De interne belasting bestaat uit de inwendige druk, de externe belasting bestaat uit de grondbelasting plus een eventuele verkeersbelasting. De inwendige druk grijpt aan op de binnendiameter van de buis. De bovenbelasting grijpt aan op de buitendiameter van de buis. Voor de bepaling van de optredende spanningen en benodigde wanddikten worden de volgende situaties doorgerekend:

- Een volledig dragende binnenbuis, de belastingen worden volledig opgenomen in de binnenbuis van de constructie, de buitenbuis en de isolatie nemen geen spanningen op;
- Een binnenbuis waar de inwendige druk wordt opgenomen en een buitenbuis waar de bovenbelasting wordt opgenomen, de isolatie neemt geen spanningen op;
- Een homogeen isolerend buismateriaal waar de spanningen in de volledige doorsnede opgenomen worden.

Figuur 5-1 geeft de schematische weergave van de te gebruiken constructie



*Figuur 5-1 Doorsnede geïsoleerde buis*

Voor de sterkteberekeningen wordt uitgegaan van een aanlegdiepte van 0,6 meter voor de bovenkant buis in een zandgrond, geen / beperkte verkeersbelasting (VB15), inwendige druk 300 kPa, de materialen PVC en PE80. Vanwege de lage sterkte-eigenschappen van een standaard isolatiemateriaal (PUR heeft een druksterkte van 0,22 MPa) wordt geen sterkte toegekend aan de isolatielaag.

tabel 5-4 geeft de berekende materiaalspanningen bij een isolatiedikte van 20 mm indien de binnenbuis (uitgevoerd in 1MPa) de tangentiële spanningen volledig opneemt. Zonder

verkeersbelasting zijn de spanningen in de binnenbuis zowel in PVC als in PE opneembaar. Rekenend met een verkeersbelasting is uitvoering in PVC niet mogelijk. Dit wordt veroorzaakt door een grotere wanddikte in PE en een lagere elasticiteitsmodulus waarmee de reroundingseffect in PE groter en de materiaalspanning lager wordt.

**Tabel 5-4 Berekende materiaalspanning in de dragende binnenbuis bij een isolatiedikte van 20 mm**

Materiaal	Buiten-diameter constructie	Diameter dragende buis	Wanddikte dragende buis	Wand-spanning met VB*	Wand-spanning zonder VB*	Toelaatbare spanning
	mm	mm	mm	MPa	MPa	MPa
PVC	80	40	1,9	14,5	5,8	10,0
PVC	90	50	2,4	13,2	5,5	10,0
PVC	103	63	2,4	14,9	6,5	12,5
PVC	115	75	2,9	14,1	6,3	12,5
PVC	130	90	3,5	13,5	6,1	12,5
PVC	150	110	4,2	13,1	6,1	12,5
PE80	80	40	3	5,5	2,8	6,3
PE80	90	50	3,7	5,2	2,8	6,3
PE80	103	63	4,7	4,9	2,7	6,3
PE80	115	75	5,6	4,7	2,6	6,3
PE80	130	90	6,7	4,6	2,6	6,3
PE80	150	110	8,1	4,5	2,6	6,3

VB\* gerekend is met een beperkte verkeersbelasting (VB15) en zonder verkeersbelasting. de rode cellen geven aan waar de toelaatbare materiaalspanning overschreden wordt

Bij een geïsoleerde buis kan ook gekozen worden voor een constructie waarbij de buitenbuis de bovenbelasting opneemt en de binnenbuis de interne waterdruk. Hierbij voldoet de binnenbuis zolang de interne druk onder de drukklasse van de binnenbuis blijft. Voor de buitenbuis is bij de gegeven maximum materiaalspanning de noodzakelijke wanddikte te berekenen. De resultaten zijn in tabel 5-5 opgenomen.

**Tabel 5-5 Benodigde wanddikten voor de buitenbuis als de bovenbelasting alleen in de buitenbuis wordt opgenomen**

Buiten-diameter	Toelaatbare spanningen		Benodigde wanddikte		Toelaatbare spanningen		Benodigde wanddikte	
	Mm	PE80 MPa	Met VB*	Zonder VB*	PVC	Met VB*	Zonder VB*	
			mm	mm	MPa	mm	mm	
80		6,3	4,4	2,1	12,5	3,1	1,5	
90		6,3	5,0	2,4	12,5	3,5	1,7	
103		6,3	5,7	2,8	12,5	4,0	2,0	
115		6,3	6,4	3,1	12,5	4,5	2,2	
130		6,3	7,2	3,5	12,5	5,1	2,5	
150		6,3	8,3	4,0	12,5	5,9	2,9	

VB\* gerekend is met een beperkte verkeersbelasting (VB15) en zonder verkeersbelasting

Vervolgens is er bepaald wat de sterkte van het materiaal moet zijn als de buiswand uit een homogeen materiaal met de noodzakelijke isolatiewaarde wordt opgebouwd. In tabel 5-6

zijn de berekende spanningen weergegeven in een dergelijk materiaal. Ter oriëntatie: een materiaal als PUR schuim heeft een toelaatbare drukspanning van 0,22 MPa.

**Tabel 5-6 Berekende spanningen bij een homogeen leidingmateriaal**

Materiaal	Buiten-diameter	Wanddikte	Berekende wandspanning	
			met VB*	zonder VB*
	Mm	mm	MPa	MPa
Homogeen	80	22	0,8	0,6
Homogeen	90	22	0,9	0,7
Homogeen	103	22	1,1	0,8
Homogeen	115	23	1,2	0,9
Homogeen	130	23	1,4	1,0
Homogeen	150	24	1,7	1,1

VB\* gerekend is met een beperkte verkeersbelasting (VB15) en zonder verkeersbelasting

### 5.3.3 Longitudinale sterkte

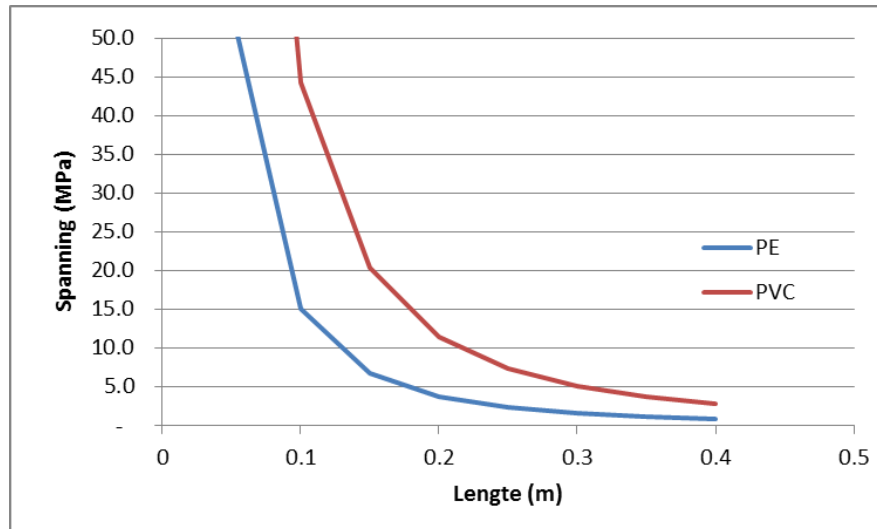
De noodzakelijke longitudinale sterkte wordt bepaald door de verwachte verticale verplaatsingen van de leiding en de lengte waarover deze verplaatsing geschiedt. Over het algemeen zijn dit bewegingen naar beneden als gevolg van zettingen van de ondergrond. Omdat de diepte van deze leidingen beperkt is tot 0,6 m op de bovenkant van de buis **bestaat ook de mogelijkheid van “opvriezen”**. Opvriezen is een situatie die hogere vervormingen oplevert van zetting. Opvriezen kan optreden in gronden met een voldoende hoge capillaire stijghoogte. In deze situatie kunnen ijslenzen ontstaan op het grensvlak tussen de bevroren en onbevroren ondergrond. Deze ijslenzen groeien aan tot aanzienlijke dikte waarbij de grond naar boven wordt gedrukt. Als er een leiding boven een dergelijke ijslens aanwezig is ontstaat er een opwaartse beweging over een korte afstand waarbij de spanningen in de leiding oplopen. De spanningen die hierbij ontstaan zijn afhankelijk van:

- De grootte van het opwaartse verplaatsing;  
Deze is beperkt door de beperkte tijd waarin de ijslens onder Nederlandse omstandigheden kan ontstaan. Hoe groter de verplaatsing hoe groter het moment.
- De stijfheid van de bevroren grond;  
Deze is groot en vergelijkbaar met een zachte steensoort.
- De lengte waarover de leiding de verplaatsing kan volgen;  
In bevroren grond is deze lengte kort. Met een korte lengte voor de noodzakelijke vervorming neemt het moment in de leiding bij vervorming toe.
- De stijfheid van de leiding (E en I).  
Dit is een eigenschap die gezocht wordt bij een bepaalde situatie (welke E en I zijn noodzakelijk) of welke spanningen ontstaan bij de aangenomen E en I. Voor de berekeningen is uitgegaan van korte duur E, deze is hoger dan die voor de lange duur.

Uit de berekeningen (zie tabel ii-5) volgt dat de spanningen in de kleine diameters bij de aangenomen verplaatsingen beperkt blijven als de lengte waarover de verplaatsing plaats vindt voldoende lang is. Voor PE geldt dit in meerdere mate vanwege de lagere elasticiteitsmodulus (E) van dit materiaal.

In de situatie met een bevroren ondergrond bestaan veel onzekerheden over de verplaatsing en de lengte waarover de verplaatsing plaats vindt. Als de verplaatsingslengte klein wordt, lopen de spanningen hoog op. In figuur 5-2 zijn de berekende spanningen uitgezet tegen de

lengte waarover de verplaatsing plaats vindt in een bevroren grond. De maximum toelaatbare spanning voor PE80 bedraagt 6,3 MPa en voor PVC 12,5 MPa; wat betekent dat verplaatsingslengtes van respectievelijk minder dan 15 cm en 20 cm een probleem zullen opleveren.



*Figuur 5-2 Spanningen in een  $\varnothing$  63 buis in bevroren zandgrond (Y-as) bij een zetting van 20 mm over een beperkte lengte (uitgezet op de X-as).*

Voor een geïsoleerde buis geldt dat een sterke zetting over een korte afstand voor een groot deel opgenomen zal worden in de isolatielaag waarmee de verplaatsingslengte langer wordt en de spanningen in het materiaal weer beperkt. Dit is echter slechts eenmalig het geval en wordt over het algemeen ook niet gemonitord.

## 5.4 Discussie

### 5.4.1 Alternatieve materialen

In de verschillende berekeningen is uitgegaan van PE80, PVC en PUR schuim als isolatiemateriaal. Deze materialen zijn inwisselbaar voor alternatieve, bekende materialen waarbij de uitkomsten niet zoveel van de hier gepresenteerde uitkomsten zullen verschillen. PVC is een sterke kunststof en PE80 een middelmatige. Kunststoffen als PB en PP bezitten eigenschappen die zich in deze range bevinden.

Ook de isolerende eigenschappen van PUR liggen in de range van de mogelijkheden voor alternatieve, bekende materialen. De gevraagde warmteweerstanden zijn in een wanddikte van 20 mm alleen te leveren bij bijzonder hoge warmteweerstanden die niet in materialen leverbaar zijn maar luchtledig gescheiden wandconstructies vragen.

### 5.4.2 Techniek

Om opwarming tot een temperatuur hoger dan 25 °C is een geïsoleerd systeem noodzakelijk. Dit vraagt aanpassingen voor de verbindingstechniek en de huisaansluitingen (geen brandkranen en afsluiters in het tertiaire net).

Omdat het tertiaire net op 60 cm diepte ligt, zullen huisaansluitingen waarschijnlijk beter aan de zijkant van de buis gemaakt worden. De kwetsbaarheid van de dienstkranen wordt anders te groot. De mogelijkheid bestaat om huisaansluitingen op vooraf bepaalde plaatsen (elke vier tot zes meter in een bebouwd gebied) in het systeem aan te brengen waarbij de

aansluiting eenvoudig gemaakt wordt en er geen ingewikkelde reparaties van isolatiemateriaal noodzakelijk zijn.

Er zijn geïsoleerde leidingssystemen op de markt voor stadsverwarming die grotendeels aan de gestelde fysische eisen voldoen. De kleine diameters kunnen op een rol geleverd worden en de grotere diameters zijn op behoorlijke lengtes (> 10 meter) leverbaar. De systemen zijn lasbaar en bij de juiste keuze voor het materiaal van de binnenbuis geschikt voor drinkwater.

Onder de opgelegde randvoorwaarden en in een beperkt klimaatscenario is het mogelijk om voor kleine diameters stadsverwarmingleidingssystemen toe te passen. Het is hierbij nodig te beseffen dat stadsverwarmingssystemen de daling in temperatuur van het te circuleren warme water beperken door een hoge stroomsnelheid. Deze omstandigheden wijken af van de omstandigheden in een drinkwaterleiding.

### 5.5 Conclusies materiaaleisen op 60 cm diepteligging leiding

Het bevriezen van een PVC drinkwaterleiding op 60 cm diepte bij een verblijftijd korter dan 12 uur is te voorkomen door voldoende thermische isolatie van de leidingwand te kiezen. Voor leidingen met diameters 40 en 50 mm zijn standaard PVC-leidingen beschikbaar; voor de grotere diameters geldt dat niet en moet dus naar alternatieven worden gezocht. PE biedt binnen de leverbare drukklasse PN16 voor geen enkele diameter voldoende thermische isolatie om bevriezen binnen 12 uur te voorkomen.

**Om opwarming boven een temperatuur hoger dan 25 °C te voorkomen is in alle vier de klimaatscenario's extra isolatie van de leiding noodzakelijk.** De haalbaarheid van een  $\lambda^*$  van 8 en 16 is niet realistisch. Bij een dergelijke  $\lambda^*$  is het benodigde isolatiepakket erg groot en de onderkant van de leiding ligt dan al snel op het niveau van de huidige diepte (1 m). Brabant Water geeft aan dat een extra wanddikte voor isolatie niet meer dan 20 mm mag bedragen. De  $\lambda^*$  is hiermee beperkt tot 6 voor een  $\varnothing$  40 mm en 2,7 voor een  $\varnothing$  110 mm leiding. **Dit betekent in de scenario's zomer 3 en 4 (een bodemtemperatuur rond het TNT van 25 °C) dat bij ca. 3% van de huishoudens een overschrijding van 25 °C aan de tap plaatsvindt (Tabel 2-3,  $\lambda^*$  tussen 1 en 4); en in de scenario's zomer 2 (een bodemtemperatuur rond het TNT van 28 °C) dat bij ca. 40% van de huishoudens een overschrijding van 25 °C aan de tap plaatsvindt (Tabel 2-3,  $\lambda^*$  tussen 1 en 4).**

Een homogene buiswand met een isolerende wanddikte van 20 mm vraagt een materiaalsterkte van 1,7 MPa in een situatie met een beperkte verkeersbelasting en een sterkte van 1,1 MPa zonder verkeersbelasting. Hiernaast is een voldoende lage elasticiteit E (orde van grootte van PE of lager) van belang om de spanningen bij beweging van de ondergrond niet te ver op te laten lopen. De benodigde tangentiële sterkte van de geïsoleerde leidingen (20 mm extra wanddikte) ligt binnen de mogelijkheden voor zowel PVC (zonder verkeersbelasting) als PE80. De benodigde longitudinale sterkte in PVC en PE wordt niet gehaald bij korte verplaatsingslengte bij opvriezen van de grond.

## 6 Conclusies

De consequenties van een verminderde diepteligging (dek van 60 cm onder maaiveld) zijn nader beschouwd:

- Bij een ondiepere ligging is de invloed van externe belasting groter en is dus steviger materiaal nodig. De benodigde sterktes zijn in PE te realiseren; in PVC alleen wanneer er geen verkeersbelasting is (hoofdstuk 5).
- Bij een ondiepere ligging is vorst een groter probleem. Het is niet eenvoudig te voorspellen hoe vaak bevroering van de bodem op 50 - 60 cm diepte op zal treden in Brabant in de komende 40 jaar, maar de kans dat het ten minste één maal gebeurt is vrij groot. Bevroering van het drinkwater kan worden voorkomen door beter geïsoleerde leidingen te gebruiken (hoofdstuk 2). Het effect van bevroren grond op schade aan de leidingen is echter niet te verwaarlozen (hoofdstuk 4). De vermeende kostenbesparing door het leidingnet minder diep te leggen, heeft een negatief effect op de kans op schade. Daarmee kunnen de onderhoudskosten behoorlijk toenemen. Wanneer in 40 jaar tijd bijvoorbeeld 20% van het leidingnet op 60 cm diepte zou liggen kan een strenge winter tot zeer veel schade leiden.
- Bij een ondiepere ligging is opwarming een probleem. **De klimaatscenario's** voorspellen hogere temperaturen en daarmee ook vaker bodemtemperaturen boven 25 °C op 60 cm diepte. Ook wanneer struiken gepland worden boven de leidingen zal de bodemtemperatuur op 60 cm diepte regelmatig boven de 25 °C uitkomen (hoofdstuk 3). Isolatiemateriaal rond de leiding kan de opwarming van het drinkwater iets vertragen, maar niet voldoende om de temperatuureis van maximaal 25 °C aan de tap te garanderen (hoofdstuk 2 en 5). Hoge temperaturen aan de tap kunnen dus niet worden voorkomen.

De conclusie is dat het aspect **“twee schoppen diep” van het concept TNT** een aantoonbaar hoger risico oplevert dan het leggen van leidingen op 1 m diepte. Daarmee is de vraag naar een nieuw type materiaal ook verdwenen, omdat 1) andere thermische eigenschappen niet nodig zijn en 2) andere aansluittechnieken minder relevant zijn op de huidige liggingsdiepte.

## 7 Discussie over het concept TNT

In dit rapport hebben we specifiek gekeken naar het minder diep leggen van het leidingnet, en de conclusie is dat dit een verhoogd risico oplevert. In dit hoofdstuk wordt een beschouwing gegeven van de overige aspecten van het TNT zoals Brabant Water door voor ogen heeft.

*De waterleiding in de woonwijken is niet veel dikker dan een tuinslang en van geheel nieuw materiaal (isolerend, Gardena-aansluitingen). Ingebouwde sensoren voor druk- en volumemeting zorgen voor snelle detectie van lekkages. Snelle aanlegtechnieken zorgen voor een minimum aan overlast voor de burger. De flexibele waterleiding wordt twee schoppen diep aan weerszijden van de straat aangelegd. Het drinkwaternet is 'groen' en 'slim': geen onderhoud en van recyclebare materialen, geen graafschade door zelfdetectie. Het nieuwe net wordt brandkraanloos ontworpen.*

Het concept TNT is zeer specifiek over een aantal oplossingen. De vragen die hierachter liggen zijn onder te verdelen in:

1. Het leidingnet moet goedkoper aangelegd kunnen worden met minder overlast voor de klant. Het gaat dan niet zozeer om nieuwe aanleg (waarbij de aanleg relatief eenvoudig is, omdat men overal goed bij kan en andere partijen ook aan het aanleggen zijn; en waarbij de klanten nog niet in de nieuwe woning wonen), maar om renovatie. Omdat de kosten vooral worden bepaald door de manuren ter plaatse, is alles wat kan worden voorbereid (prefab aansluitingen, koppelingen, etc.) een kostenbesparing. De overlast voor de klant wordt ook bepaald door de tijdsduur van werkzaamheden. Hoe sneller, hoe beter. Door tijdens renovatie samen op te trekken met andere infrabeheerders valt ook geld en tijd te besparen. Daarnaast kunnen snellere renovatietechnieken worden onderzocht; bijvoorbeeld reliningstechnieken.
2. Het eenmaal aangelegd net moet onderhoudsarm zijn. Onderhoud op het tertiaire net bestaat uit spuien en reparatie van lekken.
  - a. Spuien kan worden beperkt door zelfreinigende netten aan te leggen. Dit leidt tot goedkopere netten door kortere leidinglengtes (de lussen worden niet gesloten) en kleinere diameters. De diameters kunnen in sommige gevallen nog iets kleiner door leidingen aan weerszijden van de straat aan te leggen (maar wel grotere lengtes) en soms ook wanneer geen bluswater geleverd hoeft te worden. De diameter van een tuinslang (13 mm) is wat onrealistisch, omdat voldoende druk geleverd moet kunnen worden.
  - b. Door snellere detectie van lekken kan lekverlies worden beperkt of efficiëntere lekreparatie worden ingepland. Een business case zou moeten uitwijzen hoeveel sensoren nodig zijn om na lekdetectie het zoekgebied (leidinglengte) voldoende in te perken. Door niet op iedere leiding een sensor te plaatsen, maar bijvoorbeeld te werken met DMA's en op de ingaande leiding een sensor te plaatsen kan mogelijk voldoende worden bereikt.
3. Het leidingnet moet duurzaam zijn; materialen moeten recyclebaar zijn. Voor PE geldt dit in sterke mate, voor PVC in grote mate. Of het toepassen van sensoren bijdraagt aan de duurzaamheid is niet evident. Sensoren moeten namelijk ook van energie

worden voorzien, zodat zij kunnen meten en een signaal kunnen uitzenden wanneer er iets aan de hand is.

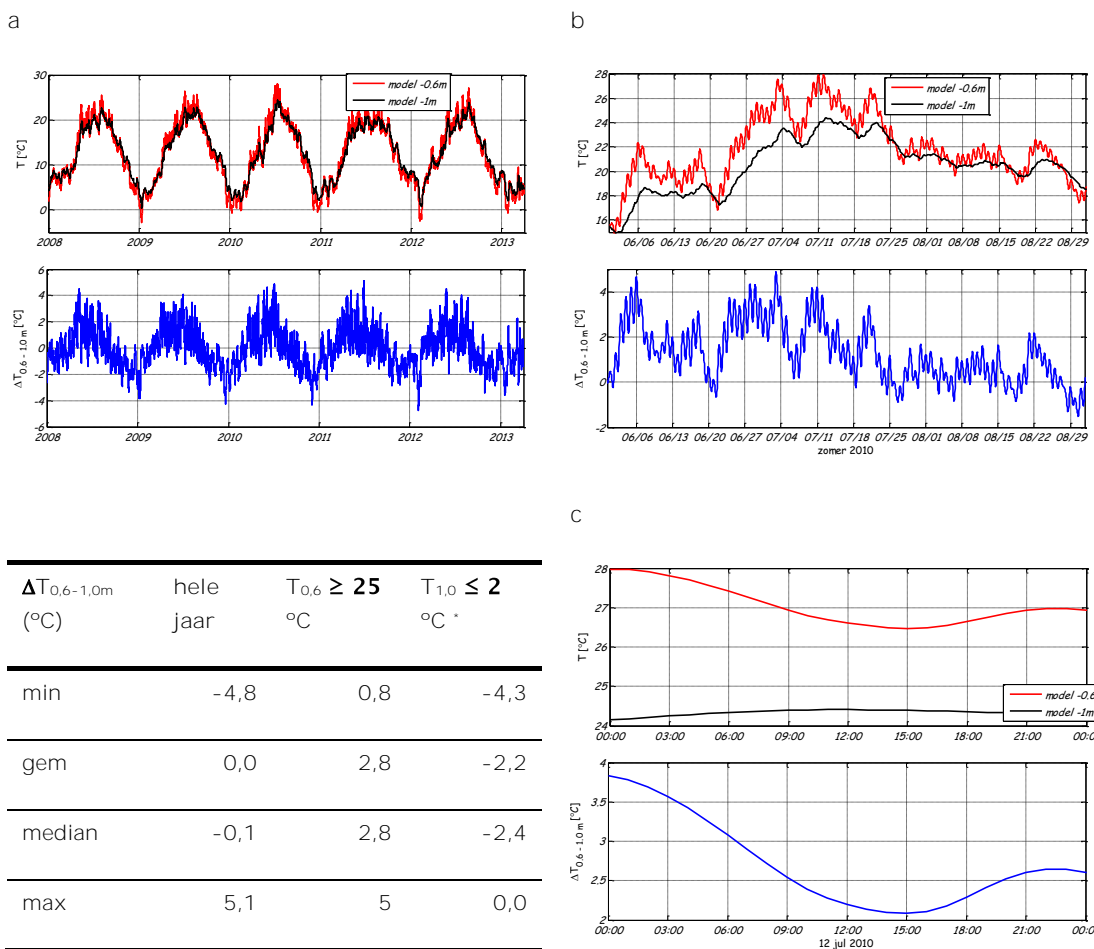


## 8 Literatuur

- Abu-Hamdeh, N. H., 2003, Thermal properties of soils as affected by density and water content, *Biosystems engineering* 86(1):97-102.
- Andersland, O. B., and Ladanyi, B., 1994, An introduction to frozen ground engineering, Chapman & Hall New York, USA.
- Blokker, E. J. M., and Pieterse-Quirijns, E. J., 2013a, Modeling temperature in the drinking water distribution system, *Journal - American Water Works Association* 105(1):E19-E29.
- Blokker, E. J. M., and Pieterse-Quirijns, E. J., 2013b, Modeling temperature in the drinking water distribution system, *JAWWA* 105(1):35-36.
- Burn, K., 1976, Frost Action and Foundations.
- Farrington, S., and Gildea, M., 2005, Frost Penetration Prediction Using Simulation with GIS, in: *Proc., 22nd Annual ESRI International User Conference*.
- Figley, D., and Snodgrass, L., 1984, The effect of basement insulation on the depth of frost penetration adjacent to insulated foundations, *Journal of Building Physics* 7(4):266-294.
- Hoffman, M. R., 2006, Publieke samenvatting NEO project Active Building Albedo Management, Nieuw Energie Onderzoek (NEO) en SenterNovem.
- Molen, M. v. d., Kooij, H., Smulders, E. F. P. A., and Heijman, S. G. J., 2008, Warmteindringing in de bodem, KWR, Nieuwegein.
- Penner, E., 1962, Ground freezing and frost heaving, DTIC Document.
- Pieterse-Quirijns, E. J., de Groot, R., de Rijck, Y., and Ruijg, K., 2011, Diepteligging van leidingen, KWR, Nieuwegein.
- Rajani, B., and Zhan, C., 1996, On the estimation of frost loads, *Canadian geotechnical journal* 33(4):629-641.
- van der Burgt, 2010, Persoonlijke communicatie met een grafdelver in Gemert (E. J. Pieterse-Quirijns, ed.).
- van der Hoeven, P. C. T., and Lablans, W. N., 1992, Grondtemperaturen, KNMI, de Bilt.
- Vewin, 2004, Waterwerkblad WB 3.5.
- Vloerbergh, I., Blokker, E. J. M., and Pieterse-Quirijns, E. J., 2013, Haalbaarheidstudie concept tertiair net van de toekomst Brabant Water, KWR, Nieuwegein.
- Williams, G., and Gold, L., 1976, CBD-180 Ground Temperatures, *National Research Council Canada*.

# Bijlage I Bodemtemperatuur

Uit het bodemtemperatuurmodel blijkt dat het temperatuurverschil tussen de bodem op 1 m diepte en 60 cm diepte sterk kan variëren. Dit komt vooral ook doordat de temperatuur op 60 cm diepte veel sterker beïnvloed wordt door de atmosferische omstandigheden dan die op 1 m diepte. Er is dus ook veel meer variatie over de dag. Tijdens een warme dag is het verschil 2 to 4 °C.



$\Delta T_{0.6-1.0m}$ (°C)	hele jaar	$T_{0.6} \geq 25$ °C	$T_{1.0} \leq 2$ °C
min	-4,8	0,8	-4,3
gem	0,0	2,8	-2,2
median	-0,1	2,8	-2,4
max	5,1	5	0,0

\* Omdat in het bodemtemperatuurmodel geen rekening is gehouden met fase-overgangen is iedere temperatuur onder de 0 °C onjuist. Het temperatuurverschil is dan ook maximaal 2 °C.

Figuur I-1. a) Gemodelleerde bodemtemperatuur met weerdata van Eindhoven 2008-2012 op 60 cm en 1 m diepte. A) 2008-2012; B) zomer 2010; C) 12 juli 2010.

## Bijlage II Tabellen

Tabel II-1 Berekende materiaalspanningen in de dragende binnenbuis (PVC)

PVC 1 Mpa			Met VB	Zonder VB	Toelaatbare wandspanning
Buitendiameter constructie	Diameter dragende buis	Wanddikte dragende buis	Wandspanning	Wandspanning	
mm	mm	mm	Mpa	Mpa	Mpa
44	40	1.9	9.4	4.6	10.0
60	40	1.9	11.7	5.2	10.0
120	40	1.9	20.2	7.1	10.0
350	40	1.9	52.7	14.7	10.0
56	50	2.4	9.4	4.6	10.0
74	50	2.4	11.4	5.1	10.0
150	50	2.4	19.9	7.1	10.0
440	50	2.4	52.4	14.7	10.0
71	63	2.4	11.5	5.7	12.5
93	63	2.4	13.9	6.3	12.5
193	63	2.4	24.5	8.8	12.5
563	63	2.4	63.9	18.0	12.5
83	75	2.9	11.3	5.6	12.5
115	75	2.9	14.1	6.3	12.5
225	75	2.9	23.9	8.6	12.5
675	75	2.9	63.8	17.9	12.5
100	90	3.5	11.3	5.6	12.5
140	90	3.5	14.2	6.3	12.5
270	90	3.5	23.8	8.5	12.5
810	90	3.5	63.6	17.8	12.5
122	110	4.2	11.4	5.7	12.5
170	110	4.2	14.3	6.4	12.5
330	110	4.2	24.1	8.7	12.5
990	110	4.2	64.3	18.1	12.5

De rode cellen geven aan wanneer de toelaatbare materiaalspanning wordt overschreden, de oranje cellen geven de onrealistische constructies weer.

Tabel II-2 Berekende materiaalspanningen in de dragende binnenbuis (PE80, PN10)

PE80 PN10			Met VB	Zonder VB	Toelaatbare wandspanning Mpa
Buitendiameter constructie Mm	Diameter dragende buis mm	Wanddikte dragende buis mm	Wand spanning Mpa	Wand spanning Mpa	
44	40	3	3.9	2.5	
60	40	3	4.6	2.6	6.3
120	40	3	7.2	3.2	6.3
350	40	3	17.3	5.6	6.3
56	50	3.7	4.0	2.5	6.3
74	50	3.7	4.6	2.6	6.3
150	50	3.7	7.3	3.3	6.3
440	50	3.7	17.5	5.6	6.3
71	63	4.7	4.0	2.5	6.3
93	63	4.7	4.6	2.6	6.3
193	63	4.7	7.4	3.3	6.3
563	63	4.7	17.7	5.7	6.3
83	75	5.6	4.0	2.5	6.3
115	75	5.6	4.7	2.6	6.3
225	75	5.6	7.3	3.2	6.3
675	75	5.6	17.8	5.7	6.3
100	90	6.7	4.0	2.5	6.3
140	90	6.7	4.8	2.7	6.3
270	90	6.7	7.3	3.3	6.3
810	90	6.7	17.8	5.7	6.3
122	110	8.1	4.0	2.5	6.3
170	110	8.1	4.8	2.7	6.3
330	110	8.1	7.3	3.3	6.3
990	110	8.1	17.9	5.8	6.3

De rode cellen geven aan wanneer de toelaatbare materiaalspanning wordt overschreden, de oranje cellen geven de onrealistische constructies weer.

Tabel II-3 Benodigde wanddikten voor de buitenbuis bij bovenbelasting

PE 80 Buitendiameter	Toelaatbare spanning N/mm <sup>2</sup>	Benodigde wanddikte	
		Met VB mm	Zonder VB mm
44	6,3	2,4	1,2
60	6,3	3,3	1,6
120	6,3	6,6	3,2
350	6,3	19,3	9,3
56	6,3	3,1	1,5
74	6,3	4,1	2,0
150	6,3	8,3	4,0
440	6,3	24,3	11,7
71	6,3	3,9	1,9
93	6,3	5,1	2,5
193	6,3	10,6	5,2
563	6,3	31,0	15,0
83	6,3	4,6	2,2
115	6,3	6,4	3,1
225	6,3	12,4	6,0
675	6,3	37,2	18,0
100	6,3	5,5	2,7
140	6,3	7,7	3,8
270	6,3	14,9	7,2
810	6,3	44,7	21,6
122	6,3	6,7	3,3
170	6,3	9,4	4,6
330	6,3	18,2	8,8
990	6,3	54,6	26,4

De oranje cellen geven de onrealistische constructies weer.

Tabel II-4 Optredende spanningen bij een homogene isolerende wand

Watervoerende buis Nominale Diameter	Buitendiameter constructie mm	Totale wanddikte mm	Materiaalspanning	
			Met VB	Zonder VB
			Totaal Mpa	Totaal Mpa
40	44	3,9	4,1	2,3
40	60	11,9	1,2	0,9
40	120	41,9	0,6	0,5
40	350	156,9	0,4	0,4
50	56	5,4	3,6	2,0
50	74	14,4	1,3	0,9
50	150	52,4	0,6	0,5
50	440	197,4	0,4	0,4
63	71	6,4	4,0	2,2
63	93	17,4	1,3	0,9
63	193	67,4	0,6	0,5
63	563	252,4	0,4	0,4
75	83	6,9	4,6	2,5
75	115	22,9	1,2	0,9
75	225	77,9	0,6	0,5
75	675	302,9	0,4	0,4
90	100	8,5	4,4	2,4
90	140	28,5	1,2	0,8
90	270	93,5	0,6	0,5
90	810	363,5	0,4	0,4
110	122	10,2	4,5	2,4
110	170	34,2	1,2	0,9
110	330	114,2	0,6	0,5
110	990	444,2	0,4	0,4

De oranje cellen geven de onrealistische constructies weer.

Tabel II-5 Optredende spanningen in de dragende buis bij opvriezende ondergrond in PVC

Materiaal Leiding	Grondsoort	Buis		Grondverplaatsing		Stijfheid grond K Pa	Materiaal spanning MPa
		Diameter buis mm	Wanddikte mm	Smax mm	I M		
PVC	Zand	40	1,9	20	0,25	1,90E+06	4,3
PVC	Zand, bevroren	40	1,9	20	0,25	1,90E+09	4,6
PVC	Zand	50	2,4	20	0,25	1,90E+06	5,0
PVC	Zand, bevroren	50	2,4	20	0,25	1,90E+09	5,8
PVC	Zand	63	2,4	20	0,25	1,90E+06	5,7
PVC	Zand, bevroren	63	2,4	20	0,25	1,90E+09	7,3
PVC	Zand	75	2,9	20	0,25	1,90E+06	6,0
PVC	Zand, bevroren	75	2,9	20	0,25	1,90E+09	8,7
PVC	Zand	90	3,5	20	0,25	1,90E+06	6,0
PVC	Zand, bevroren	90	3,5	20	0,25	1,90E+09	10,5
PVC	Zand	110	4,2	20	0,25	1,90E+06	5,9
PVC	Zand, bevroren	110	4,2	20	0,25	1,90E+09	12,8
PVC	Zand	40	1,9	20	0,125	1,90E+06	11,6
PVC	Zand, bevroren	40	1,9	20	0,125	1,90E+09	18,6
PVC	Zand	50	2,4	20	0,125	1,90E+06	11,3
PVC	Zand, bevroren	50	2,4	20	0,125	1,90E+09	23,2
PVC	Zand	63	2,4	20	0,125	1,90E+06	11,3
PVC	Zand, bevroren	63	2,4	20	0,125	1,90E+09	29,2
PVC	Zand	75	2,9	20	0,125	1,90E+06	10,4
PVC	Zand, bevroren	75	2,9	20	0,125	1,90E+09	34,4
PVC	Zand	90	3,5	20	0,125	1,90E+06	9,5
PVC	Zand, bevroren	90	3,5	20	0,125	1,90E+09	40,6
PVC	Zand	110	4,2	20	0,125	1,90E+06	8,5
PVC	Zand, bevroren	110	4,2	20	0,125	1,90E+09	47,9

De rode cellen geven aan wanneer de toelaatbare materiaalspanning wordt overschreden.

Tabel II-6 Optredende spanningen in de dragende buis bij opvriezende ondergrond in PE

Materiaal		Buis		Grondverplaatsing		Stijfheid grond	Materiaal
Leiding	Grondsoort	Diameter buis mm	Wanddikte mm	Smax mm	I M	K Pa	spanning MPa
PE	Zand	40	3	20	0.25	1.90E+09	1.5
PE	Zand, bevroren	40	3	20	0.25	1.90E+09	1.5
PE	Zand	50	3.7	20	0.25	1.90E+06	1.8
PE	Zand, bevroren	50	3.7	20	0.25	1.90E+09	1.9
PE	Zand	63	4.7	20	0.25	1.90E+06	2.0
PE	Zand, bevroren	63	4.7	20	0.25	1.90E+09	2.4
PE	Zand	75	5.6	20	0.25	1.90E+06	2.2
PE	Zand, bevroren	75	5.6	20	0.25	1.90E+09	2.9
PE	Zand	90	6.7	20	0.25	1.90E+06	2.3
PE	Zand, bevroren	90	6.7	20	0.25	1.90E+09	3.5
PE	Zand	110	8.1	20	0.25	1.90E+06	2.3
PE	Zand, bevroren	110	8.1	20	0.25	1.90E+09	4.3
PE	Zand	40	3	20	0.125	1.90E+06	4.5
PE	Zand, bevroren	40	3	20	0.125	1.90E+09	6.2
PE	Zand	50	3.7	20	0.125	1.90E+06	4.6
PE	Zand, bevroren	50	3.7	20	0.125	1.90E+09	7.7
PE	Zand	63	4.7	20	0.125	1.90E+06	4.5
PE	Zand, bevroren	63	4.7	20	0.125	1.90E+09	9.8
PE	Zand	75	5.6	20	0.125	1.90E+06	4.2
PE	Zand, bevroren	75	5.6	20	0.125	1.90E+09	11.6
PE	Zand	90	6.7	20	0.125	1.90E+06	3.9
PE	Zand, bevroren	90	6.7	20	0.125	1.90E+09	13.7
PE	Zand	110	8.1	20	0.125	1.90E+06	3.5
PE	Zand, bevroren	110	8.1	20	0.125	1.90E+09	16.4

De rode cellen geven aan wanneer de toelaatbare materiaalspanning wordt overschreden.



## Bijlage III Lengte en diameters vijf netwerkontwerpen

Overzicht leidinglengte en inhoud per ontwerp. In grijs het secundaire net.

Diameter (mm)	Wand- ruwheid (mm)	Materiaal	Lengte (m)					Inhoud (m <sup>3</sup> )				
			A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
21	0.051	PE			444.8	398.9	449.0			0.2	0.1	0.2
28	0.051				480.7	841.3	1231.6			0.3	0.5	0.8
35	0.051				1019.1	1753.3	2538.0			1.0	1.7	2.4
36	0.05	PVC	464.4	406.2				0.5	0.4			
46	0.05		359.1	359.1				0.6	0.6			
54	0.2	AC	1617.4	1393.8				3.7	3.2			
58.2	0.05	PVC			799.7	1984.9	2328.5			2.1	5.3	6.2
59	0.05		78.4	11.0				0.2	0.0			
69	0.05		1.5	1.5				0.0	0.0			
74	0.05		2.2	2.2				0.0	0.0			
100	0.2	AC	3454.4	4257.9				27.1	33.4			
103.4	0.05	PVC	585.7	585.7	3735.7	1030.5	907.8	4.9	4.9	31.4	8.7	7.6
104.6	0.05		352.8	384.9				3.0	3.3			
150	0.2	AC	821.8	821.8				14.5	14.5			
150.6	0.05	PVC	731.8	731.8				13.0	13.0			
152	0.05		99.5	99.5	1020.6	1019.9	1019.9	1.8	1.8	18.5	18.5	18.5
296.6	0.05		8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
300	2	GGIJ	333.4	333.4	333.4	333.4	333.4	23.6	23.6	23.6	23.6	23.6
376.6	0.05	PVC	77.7	77.7	77.7	77.7	77.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
470.8	0.05		10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
475	0.22	AC	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
500	0.2	AC	320.3	320.3	320.3	320.3	320.3	62.9	62.9	62.9	62.9	62.9
515	0.053	PE	124.9	124.9	124.9	124.9	124.9	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0
570	0.22	GGIJ	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
593.3	0.05	PVC	221.8	221.8	221.8	221.8	221.8	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3
600	0.1	Beton	42.1	42.1	42.1	42.1	42.1	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
800	0.05	PVC	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
<b>Totaal</b>			<b>9756.6</b>	<b>10243.1</b>	<b>8688.3</b>	<b>8216.5</b>	<b>9662.6</b>	<b>277.9</b>	<b>283.7</b>	<b>261.9</b>	<b>243.2</b>	<b>244.1</b>