



# Meer met Bodemenergie

## Autonome opwarming

Autonome ontwikkeling  
bodemtemperatuur



# Rapport 8 – Autonome opwarming

Autonome ontwikkeling bodemtemperatuur

Eindrapport

**Colofon**

Dit is een gezamenlijk rapport van Bioclear, Deltares, IF Technology en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie.

**Opdrachtgever**

SKB duurzame ontwikkeling ondergrond  
Postbus 420  
2800 AK GOUDA  
T 0182 – 54 06 90  
E [info@skbodem.nl](mailto:info@skbodem.nl)  
Contactpersoon: Arno Peekel

**Auteur**

Benno Drijver, IF Technology

**Datum**

30 maart 2012

**Goedgekeurd door de Technische Commissie Meer met Bodemenergie**

Maurice Henssen, Bioclear  
Hans Gehrels, Deltares  
Guido Bakema, IF Technology  
Tim Grotenhuis, Wageningen Universiteit  
Huub Rijnaarts, Wageningen Universiteit

**Penvoerder**

Marc Koenders, IF Technology

**Secretariaat**

Marion Hetterscheid, IF Technology

**Website**

[www.meermetbodemenergie.nl](http://www.meermetbodemenergie.nl)

Copyright © cover Identim 2012

Copyright © MMB 2012

Delen uit dit rapport mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Meer met Bodemenergie (MMB), de titel van de publicatie en jaar van uitgave'.

## Participanten

Agentschap NL / Bodem+  
Arcadis  
Brabant Water - Hydreco  
Eneco  
Essent  
gemeente Almelo  
gemeente Amersfoort  
gemeente Apeldoorn  
gemeente Den Bosch  
gemeente Deventer  
gemeente Haarlem  
gemeente Hengelo  
gemeente Tilburg  
gemeente Utrecht  
gemeente Zwolle  
Havenbedrijf Rotterdam  
NVOE  
Productschap Tuinbouw  
provincie Drenthe  
provincie Flevoland  
provincie Friesland  
provincie Gelderland  
provincie Groningen  
provincie Limburg  
provincie Noord-Brabant  
provincie Noord-Holland  
provincie Overijssel  
provincie Utrecht  
provincie Zeeland  
provincie Zuid-Holland  
SKB  
Stichting Bodemsanering NS  
Vewin  
Vitens  
Waterschap Groot Salland  
Waterschap Regge en Dinkel

## Samenvatting

Dit is de samenvatting van de studie naar de autonome ontwikkeling van de bodemtemperatuur die uitgevoerd is binnen het project Meer Met Bodemenergie. Het rapport bevat een analyse van de omvang van de thermische invloed van klimaatverandering en verstedelijking op de bodemtemperatuur. De resultaten van het onderzoek kunnen worden gebruikt als input voor de beleidsdiscussie en zijn het meest van belang voor het beleid met betrekking tot de energiebalans bij WKO-systemen.

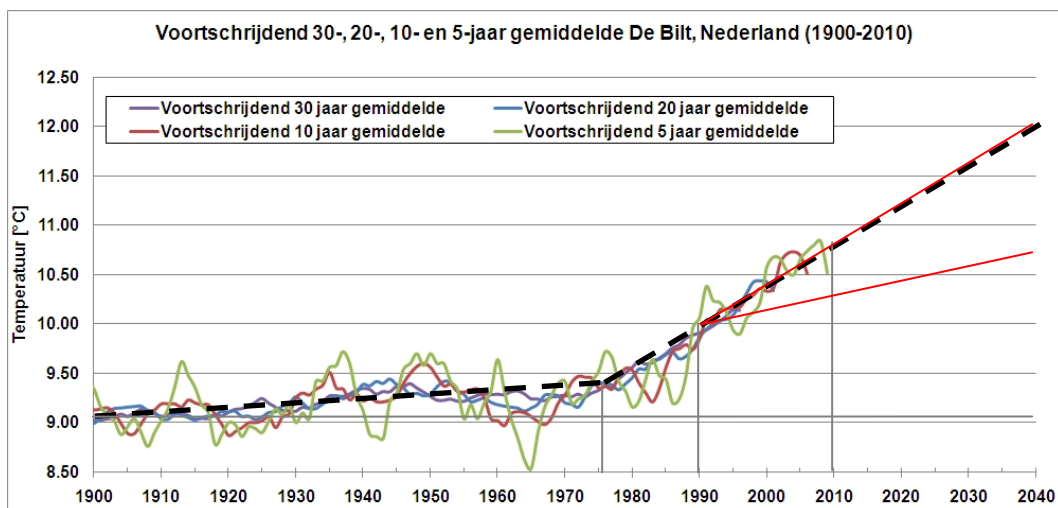
Thermische veranderingen in de bodemtemperatuur kunnen het gevolg zijn van klimaatverandering, verstedelijking en de opslag van warmte en/of koude.

- Door klimaatverandering en de toename van het broeikaseffect is de gemiddelde luchttemperatuur in Nederland sinds 1900 met circa 1,7 °C toegenomen. Deze opwarming is ook zichtbaar in de bodemtemperatuur. De verwachting is dat gemiddelde luchttemperatuur in de toekomst verder zal oplopen.
- Door verstedelijking ontstaat een 'urban heat island' effect (UHI; stedelijk warmte eiland). Een UHI is het fenomeen dat de luchttemperatuur in een stedelijk gebied hoger is dan in het omliggende landelijk gebied. De belangrijkste oorzaken van het UHI zijn de absorptie van zonlicht door de in de stad aanwezige donkere materialen, bemerking van de uitstraling door de bebouwing, de relatief lage windsnelheden en warmteproductie door menselijke activiteiten (verwarming, transport, etc.).
- In de directe omgeving van bronnen van WKO-systemen is sprake van beïnvloeding van de bodemtemperatuur. In de omgeving van de koude bronnen is sprake van een afname van de bodemtemperatuur en in de omgeving van de warme bron is dat een toename. Als sprake is van een energiebalans, dan is de hoeveelheid warmte die in de bodem achterblijft gelijk aan de hoeveelheid koude en treedt geen netto opwarming of afkoeling plaats. Bij een energie-onbalans zal een WKO de bodem netto afkoelen bij een netto warmteonttrekking of opwarmen bij een netto koudeonttrekking.

In dit rapport is de autonome opwarming van de ondergrond onderzocht die is opgetreden sinds 1900 en die in de periode tot 2040 nog mag worden verwacht. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen landelijk gebied, waar alleen de klimaatverandering een rol speelt, en stedelijk gebied, waar ook het UHI-effect van belang is. Deze aspecten worden tevens onderzocht in het nog lopende promotieonderzoek van Visser (zie Visser et al., 2011).

De gevolgen van deze temperatuurveranderingen voor de chemische en microbiologische kwaliteit van het grondwater komen aan bod in MMB-rapport 2 - Literatuuronderzoek, MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond en in het nog lopende promotieonderzoek van Bonte (zie Bonte, et al. 2010a, 2011a, 2011b, 2011c).

Om de invloed te kunnen berekenen is informatie nodig over de omvang van de opwarming en het verloop in de tijd. Figuur 0.1 toont het voortschrijdend gemiddelde van de luchttemperatuur in De Bilt voor perioden van 5, 10, 20 en 30 jaar. De rode lijnen in de grafiek geven de voorspellingen volgens de KNMI klimaatscenario's aan: een stijging van de temperatuur in 2050 met minimaal 0,9 °C en maximaal 2,5 °C ten opzichte van 1990. De stippellijn geeft het uitgangspunt voor de berekeningen in dit rapport weer: aangenomen is dat de temperatuurstijging die optreedt sinds halverwege de jaren '70 zich voortzet, wat gelijk is aan het maximale scenario uit de klimaatscenario's van het KNMI van 2006 (de voortschrijdende gemiddelden geven aan dat de stijging tot 2010 het maximale scenario volgt). Uit figuur 0.1 volgt een temperatuurstijging van 1,7 °C tussen 1900 en 2010 en nog eens 1,2 °C tussen 2010 en 2040. Hier is gekozen voor het jaar 1900, omdat de opwarming door klimaatverandering op dat moment is begonnen (op basis van de temperatuurmetingen in De Bilt).



**figuur 0.1** Voortschrijdende 5, 10, 20 en 30-jaar gemiddelden van de temperatuur in De Bilt. De rode lijnen tonen de bandbreedte van de voorspelde temperatuurstijging uit de klimaatscenario's van het KNMI van 2006 (stijgingen ten opzichte van het klimaat in 1990). De stippellijn geeft de schematisatie weer van de temperatuurstijging door klimaatverandering die is aangehouden voor de berekeningen in dit rapport

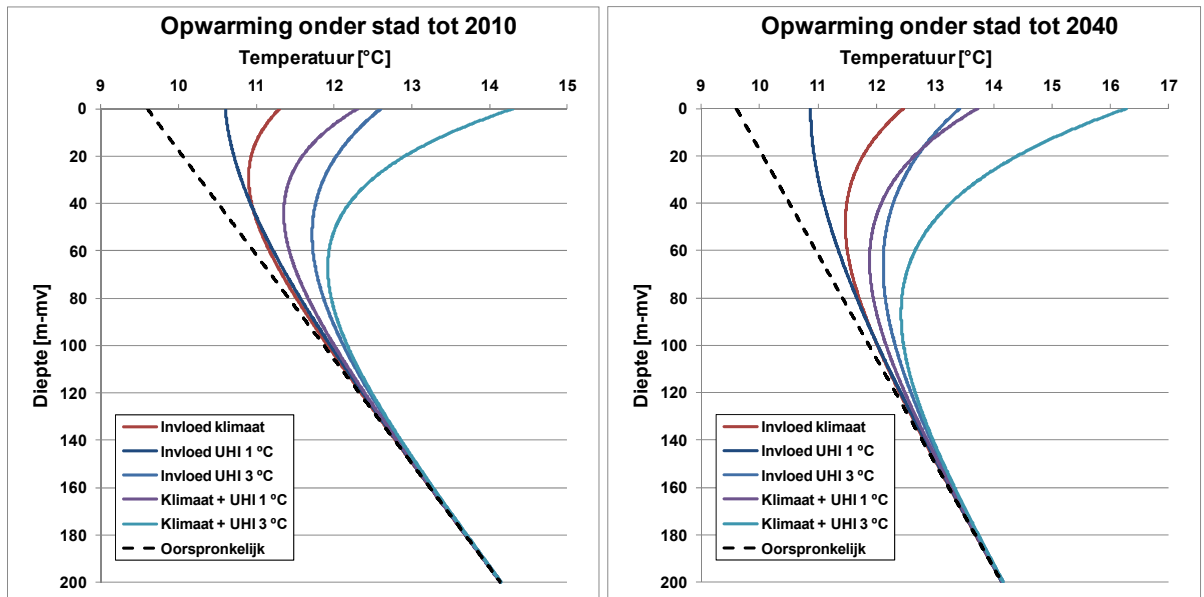
Naast de klimaatverandering is voor het stedelijk gebied ook de omvang van het UHI-effect van belang. Met behulp van bodemtemperatuurmetingen binnen en buiten het stedelijk gebied is het UHI-effect geschat op 1 à 3 °C, afhankelijk van de grootte en bebouwingsdichtheid van de betreffende stad en de locatie in de stad (aan de rand of in het centrum). Over het verloop van de omvang van het UHI-effect in de tijd is geen informatie gevonden. In dit rapport is aangenomen dat het UHI-effect vanaf 1900 tot nu lineair is verlopen en dat deze trend zich in de toekomst in gelijke mate doorzet. Tabel 0.1 toont de gekozen uitgangspunten voor de berekeningen.

**tabel 0.1      Uitgangspunten berekeningen autonome opwarming**

<b>Periode</b>	<b>Opwarming door klimaatverandering [°C/jaar]</b>	<b>UHI 1 °C in 2010 [°C/jaar]</b>	<b>UHI 3 °C in 2010 [°C/jaar]</b>	<b>Klimaatv. + UHI 1 °C [°C/jaar]</b>	<b>Klimaatv. + UHI 3 °C [°C/jaar]</b>
1900-1975	0,0045	0,0091	0,0273	0,0136	0,0318
1976-2010	0,035	0,0091	0,0273	0,0479	0,0661
2010-2040	0,035	0,0091	0,0273	0,0479	0,0661
Totaal 1900-2010	1,7 °C	1,0 °C	3,0 °C	2,7 °C	4,7 °C
Totaal 1900-2040	2,86 °C	1,27 °C	3,82 °C	4,13 °C	6,68 °C

### Resultaten

Met de kentallen uit tabel 0.1 zijn een aantal scenario's doorgerekend (zie hoofdstuk 4) voor de periode van 1900-2010 en voor 1900-2040, waarbij zowel de individuele effecten (alleen klimaatverandering, alleen UHI-effect) in beeld zijn gebracht als het totale effect. Figuur 0.2 toont de resultaten van de berekeningen en de uitgangssituatie in 1900 (stippellijn). De resultaten komen goed overeen met de verwachting op basis van metingen, zowel binnen het hier uitgevoerde onderzoek als andere onderzoeken die in Nederland zijn uitgevoerd (Kooi, 2008 en Visser et al., 2011).



**figuur0.2** Berekende temperatuur in de ondergrond onder stedelijk gebied in 2010 (links) en 2040 (rechts). Voor 1900 (in de grafieken aangegeven als stippel-lijn) is aangenomen dat klimaatverandering en/of verstedelijking nog geen effect hebben op de bodemtemperatuur.

### Vergelijking met effecten WKO

Afhankelijk van het gekozen scenario varieert de stijging van de oppervlaktetemperatuur tussen 1 en 7 °C. De stijging van de bodemtemperatuur neemt snel af in de diepte en is op 150 m diepte te verwaarlozen. Bij WKO-systemen ligt het temperatuurverschil tussen het onttrokken en het geïnfiltrerde water in de praktijk op gemiddeld 4,3 °C. Rekening houdend met enige temperatuurverliezen in de ondergrond zal het verschil tussen de gemiddelde infiltratietemperaturen in de warme en de koude bron ongeveer 5 °C zijn. De temperatuur van de warme bron ligt dus ongeveer 2,5 °C hoger dan de natuurlijke grondwatertemperatuur. Volgens de berekeningen is een autonome opwarming met 2,5 °C mogelijk tot maximaal 40 m diepte (scenario voor 2040 met het grootste UHI-effect). In veel gevallen bevinden WKO-systemen zich dieper dan deze 40 m en zullen de lokale temperatuurveranderingen als gevolg van WKO groter zijn dan die van de autonome opwarming.

Het is ook mogelijk om de temperatuureffecten van WKO op gebiedsniveau te vergelijken met die van de autonome opwarming. Uit berekeningen voor het centrum van Den Haag, één van de gebieden met de hoogste dichtheid van (open) WKO-systemen in Nederland, volgt dat de te verwachten netto invloed van WKO kleiner is dan de invloed van de autonome opwarming op dezelfde diepte (20-60 m-mv). De berekende invloed van de WKO is een (gebieds)gemiddelde temperatuurverandering van -0,02 °C per jaar (uitgaande van een energie(on)balans van -10%: koudeoverschot) respectievelijk +0,01 °C per jaar (energie(on)balans van +5%: warmteoverschot).



### **Energie(on)balans**

In het huidige beleid geldt voor open WKO-systemen een eis van energiebalans. Dat wil zeggen dat de hoeveelheid warmte die in een bepaalde (langjarige) periode aan de bodem wordt toegevoegd binnen bepaalde marges gelijk moet zijn aan de hoeveelheid warmte die in diezelfde periode aan de bodem wordt onttrokken. Deze energiebalans eis heeft consequenties voor het ontwerp en de bedrijfsvoering van WKO-systemen en staat daarom ter discussie. Momenteel wordt door DWA en IF, in opdracht van SKB, een onderzoek uitgevoerd naar het nut en de noodzaak van deze energiebalans. Het gegeven dat autonome opwarming van de ondergrond plaatsvindt, geeft aan dat ook zonder WKO of bij een WKO met een perfecte energiebalans sprake is van een overall energieonbalans. De bodem warmt immers op door klimaatverandering en verstedelijking.

### **Gevolgen voor toepasbaarheid van WKO**

Uit de berekeningen volgt dat de autonome opwarming van de ondergrond sterk afhankelijk is van de diepte (zie figuur 0.2). De autonome opwarming van de ondergrond is geconcentreerd in de bovenste 50 à 100 meter van de ondergrond en zal pas op zeer lange termijn (honderden tot duizenden jaren) op grotere diepten merkbaar zijn. Bij (open) WKO-systemen die zich in dieper gelegen watervoerende pakketten bevinden speelt de autonome opwarming dan ook geen rol van betekenis.

De gesloten WKO-systemen bevinden zich nagenoeg allemaal volledig in de bovenste 100 meter en ondervinden daardoor de meeste invloed van de autonome opwarming. Aangezien een groot deel van de gesloten systemen hoofdzakelijk wordt gebruikt voor verwarming, is de opwarming voor een groot deel van de gesloten systemen gunstig voor het functioneren: deze systemen kunnen nuttig gebruik maken van de warmte die als gevolg van de autonome opwarming aan de ondergrond wordt toegevoegd.

De uitgevoerde berekeningen geven aan dat de totale opwarming over de periode 2010-2040 in stedelijk gebied uit komt op 0,9 à 1,5 °C op 20 m diepte en 0,15 à 0,3 °C op 100 m-mv. Hoewel een temperatuurstijging van meer dan 1 °C aanzienlijk is, heeft deze stijging geen noemenswaardige gevolgen voor de toepasbaarheid of het functioneren van (open) WKO-systemen, hetgeen wordt bevestigd door de aanwezigheid van WKO-systemen in watervoerende pakketten met sterk uiteenlopende natuurlijke temperaturen (in Nederland globaal tussen 9 en 14 °C).

Recirculatiesystemen kunnen overigens wel degelijk gevoelig zijn voor veranderingen van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Opwarming maakt het opgepompte water bij deze systemen minder geschikt voor koelingsdoeleinden: voor het leveren van hetzelfde koelvermogen zal door de hogere temperatuur veelal een hoger debiet nodig zijn.

### Nuttig gebruiken opgebouwde warmtevoorraad

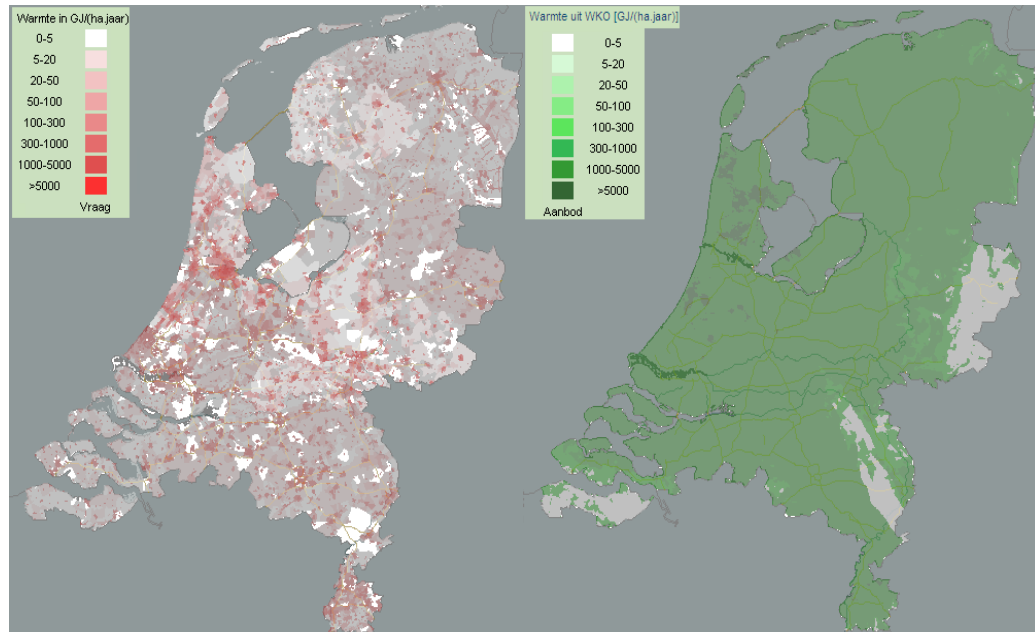
Voor de in figuur 0.2 getoonde opwarming van de ondergrond is door de hoge warmtecapaciteit van de ondergrond een grote hoeveelheid energie nodig. De hoeveelheid energie die aan de bodem is toegevoegd en in de toekomst nog wordt toegevoegd door de stijgende temperatuur aan de oppervlakte kan eenvoudig worden berekend (resultaten zijn weergegeven in tabel 0.2) en vervolgens worden vergeleken met de energievraag van bebouwing aan de oppervlakte. Deze vergelijking is relevant voor WKO-systemen, aangezien die niet alleen kunnen worden gebruikt om energie in de bodem op te slaan, maar ook om energie aan de bodem te onttrekken.

Als het gewenst is dat de bodemtemperatuur gelijk blijft, zou men wellicht gebruik kunnen maken van de inzet van WKO om het effect van de autonome opwarming te compenseren door netto warmte aan de bodem te onttrekken. Dit zou dan betekenen dat de WKO bewust in onbalans geopereerd wordt. Het is dan wel van belang om inzicht te hebben in de verhoudingen tussen de warmte en koudevraag van de gebouwen aan de oppervlakte (die met WKO kan worden geleverd) en de energie die de bodem opneemt als gevolg van de autonome opwarming. In tabel 0.2 is de berekende autonome opwarming van de ondergrond omgerekend naar GWh per km<sup>2</sup> per jaar.

**tabel 0.2 Berekende hoeveelheid energie die aan de bodem is toegevoegd als gevolg van de opwarming door klimaatverandering en verstedelijking.**

Opwarming (klimaat+UHI)	1900-2010	2010-2040	1900-2040	1900-2010	2010-2040	1900-2040
	GWh/km <sup>2</sup>	GWh/km <sup>2</sup>	GWh/km <sup>2</sup>	GWh/km <sup>2</sup> /j	GWh/km <sup>2</sup> /j	GWh/km <sup>2</sup> /j
				r	r	r
Klimaat	33	35	68	0,3	1,2	0,5
Klimaat +1 °C	61	47	108	0,6	1,6	0,8
Klimaat +2 °C	89,5	59,5	149	0,8	2,0	1,1
Klimaat +3 °C	118	72	190	1,1	2,4	1,4

Het warmtegebruik aan de oppervlakte is in kaart gebracht door Agentschap NL (<http://agentschapnl.kaartenbalie.nl>). Hierbij is ook het potentieel aan warmte dat met WKO kan worden geleverd vanuit de ondergrond beschikbaar gemaakt (figuur 0.3).

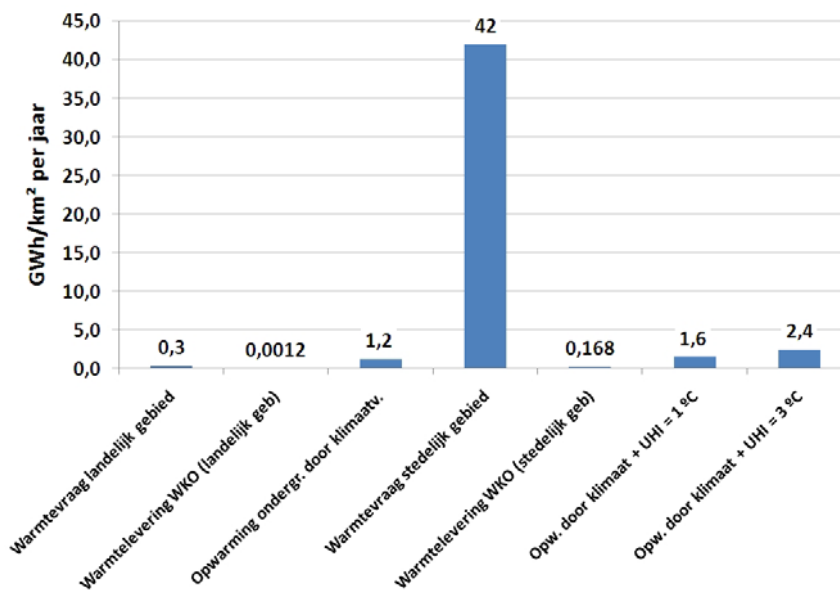


**figuur 0.3** Links: Kaart met de warmtevraag per hectare (excl. industrie). De jaarlijkse energievraag varieert van 0-20 GJ/ha op het platteland tot lokaal >5000 GJ/ha in de steden. Rechts: Potentiele hoeveelheid warmte die in Nederland kan worden geleverd met WKO. Dit potentiele aanbod varieert van 0-500 GJ/ha per jaar in het oosten tot >5000 GJ/ha per jaar in het westen van het land (Bron: <http://agentschapnl.kaartenbalie.nl>). Alleen de warmtevraag is bekend, over de koudevraag zijn geen gegevens beschikbaar.

Voor het landelijk gebied is de warmtevraag 0-0,6 GWh/km<sup>2</sup> per jaar. De opwarming van de ondergrond is hier vrijwel alleen het gevolg van klimaatverandering en bedraagt 1,2 GWh/km<sup>2</sup> per jaar. In het landelijke gebied is de opwarming van de ondergrond dus groter dan de warmtevraag aan de oppervlakte. Zelfs als de volledige warmtevraag aan de oppervlakte van alle bebouwing (excl. industrie) wordt geleverd door warmteonttrekking aan de bovenste 50 à 100 m van de bodem, dan zal op gebiedsniveau nog altijd sprake zijn van een netto opwarming van de ondergrond.

Het grootste deel van de stedelijke gebieden heeft een energievraag tussen 1.000 en 2.000 GJ/ha per jaar, wat overeen komt met 28 tot 56 GWh/km<sup>2</sup> per jaar ofwel 830 tot 1.670 GWh/km<sup>2</sup> over de periode 2010-2040. De totale opwarming van de ondergrond in de periode 2010-2040 bedraagt 50-70 GWh/km<sup>2</sup> en komt overeen met ongeveer 5% van de warmtevraag in dezelfde periode. In de periode 1900-2010 is nog eens 60-120 GWh/km<sup>2</sup> aan “warmtevoorraad” opgebouwd (ongeveer 7% van de warmtevraag van 2010-2040). Opgemerkt wordt, dat de opwarming van de ondergrond geconcentreerd is in de bovenste 50-100 meter.

Op basis van gegevens van het CBS over 2009 (CBS, 2010) werd in 2009 ongeveer 0,4% van de totale warmtevraag van de huishoudens, utiliteitsbouw en de landbouw geleverd met ondiepe bodemenergiesystemen. De jaarlijkse autonome opwarming van de ondergrond in stedelijk gebied was in 2009 dus ongeveer 12,5 keer zo groot als de warmtelevering met WKO. Aangezien de meeste WKO-systemen bovendien niet alleen warmte onttrekken maar ook opslaan, kan worden geconcludeerd dat de opwarming van de ondergrond op stadsniveau de komende decennia groter zal zijn dan de netto warmteonttrekking door WKO (zelfs als ambitieuze groei-doelstellingen voor WKO gehaald worden).



**figuur 0.4** Verhoudingen tussen enerzijds de jaarlijkse opwarming van de ondergrond onder invloed van klimaatverandering en verstedelijking en anderzijds de gemiddelde warmtevraag in landelijk en stedelijk gebied, respectievelijk de huidige gemiddelde warmtelevering door WKO in landelijk en stedelijk gebied

# Inhoudsopgave

Samenvatting .....	4
1 Inleiding .....	13
1.1 Kader .....	13
1.2 Leeswijzer .....	14
1.2.1 Bestaande kennis .....	14
1.3 Bepalende factoren voor de bodemtemperatuur .....	14
1.3.1 Geothermische gradiënt .....	14
1.3.2 Oppervlaktetemperatuur .....	15
1.3.3 Grondwaterstroming .....	17
1.4 Opwarming door klimaatverandering .....	17
1.4.1 Klimaatverandering in het verleden .....	17
1.4.2 Verwachting klimaatverandering in de toekomst .....	19
1.5 Opwarming door verstedelijking .....	22
1.5.1 Oorzaken .....	22
1.5.2 Omvang van het effect .....	24
1.6 Opwarming door klimaatverandering: effect op de bodemtemperatuur .....	40
2 Uitgangspunten autonome opwarming .....	45
2.1 Opwarming door klimaatverandering .....	45
2.2 Opwarming door verstedelijking .....	46
2.3 Meetgegevens bodemtemperatuurprofielen .....	52
2.4 Meetgegevens divers .....	58
2.5 Conclusie .....	62
3 Analyse omvang effecten .....	63
3.1 Verandering in oppervlaktetemperatuur: klimaatverandering en verstedelijking .....	63
3.2 Vergelijking autonome opwarming van de bodem met energievraag .....	69
3.2.1 Energetische balans .....	69
3.2.2 Energievraag aan de oppervlakte .....	73
3.2.3 Vergelijking energievraag met autonome opwarming ondergrond .....	76
4 Evaluatie resultaten .....	79
4.1 Discussie .....	79
4.2 Conclusies en aanbevelingen .....	85
Literatuur .....	87
Bijlage I Bodemtemperatuurmetingen IF Technology .....	XCII
Bijlage II Betrouwbaarheid en drift temperatuurgegevens divers .....	XCV

# 1 Inleiding

Dit rapport is een gezamenlijk product van IF Technology, Bioclear, Deltares en Wageningen Universiteit in het kader van het project Meer met Bodemenergie (MMB). De doelstelling van dit project is beschreven in het onderzoeksplan en luidt als volgt:

- inhoudelijke kennis vergroten ten aanzien van de relatie tussen bodemenergie en grondwaterkwaliteit;
- risico's en kansen in beeld brengen ten aanzien van de verwachte sterke groei van bodemenergie in Nederland;
- ondersteuning bieden bij het beantwoorden van beleidsmatige en operationele vraagstukken rondom bodemenergie.

Meer informatie over het onderzoeksprogramma is te vinden op de website:

[www.meermetbodemenergie.nl](http://www.meermetbodemenergie.nl).

Het toepassingsgericht onderzoek is eind 2009 gestart en zal nog doorlopen tot eind 2011. In dit rapport zijn de resultaten opgenomen van het onderzoek dat in het kader van MMB is uitgevoerd op het gebied van de autonome ontwikkeling van de bodemtemperatuur.

## 1.1 Kader

Doel van WKO is het tijdelijk opslaan van overschotten van warmte (of koude) in de ondergrond, zodat deze kan worden ingezet in perioden waarin de warmtevraag (of koudevraag) groter is dan het aanbod. Consequentie van het opslaan van warmte en koude in de ondergrond is dat de temperatuur van de bodem en het grondwater wordt beïnvloed: er is sprake van thermische effecten.

De temperatuur van de ondergrond wordt echter niet alleen door WKO beïnvloed. Belangrijke andere processen die van invloed zijn op de bodemtemperaturen zijn klimaatverandering, veranderingen in het landgebruik en veranderingen in de grondwaterstroming. Het is dan ook van belang om inzicht te verkrijgen in de verhouding tussen deze andere invloeden (autonome effecten op de bodemtemperatuur) en de effecten die door WKO worden veroorzaakt.

## 1.2 Leeswijzer

Aangezien WKO-systemen vooral in stedelijk gebied worden gerealiseerd, concentreert het onderzoek binnen Meer Met Bodemenergie zich op de effecten die in stedelijke gebieden van belang zijn. Het gaat hierbij om de opwarming als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking (stedelijk warmte-eiland). In dit rapport zijn de volgende onderwerpen opgenomen:

### **Hoofdstuk 2) Bestaande kennis**

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van de bestaande kennis over bodemtemperaturen. Dit hoofdstuk is voor een belangrijk deel gebaseerd op hoofdstuk 5 van de literatuurstudie van Meer Met Bodemenergie (temperatuurveranderingen in het verleden).

### **Hoofdstuk 3) Analyse omvang effecten**

In dit hoofdstuk is de beschikbare informatie over de verschillende effecten weergegeven. Voor de klimaatverandering kan gebruik worden gemaakt van klimaatgegevens. Ook is op basis van de beschikbare metingen een schatting gemaakt van de omvang van het stedelijk warmte-eiland effect in Nederland.

### **Hoofdstuk 4) Berekeningen autonome opwarming ondergrond**

Op basis van de gegevens over de temperatuurstijging door klimaatverandering en verstedelijking zijn berekeningen uitgevoerd om de opwarming van de ondergrond in stedelijk gebied te kwantificeren. Hierbij is zowel de opwarming in het verleden berekend, als de opwarming die in de toekomst mag worden verwacht. Ook zijn scenario's doorgerekend met en zonder grondwaterstroming.

### **Hoofdstuk 5) Evaluatie resultaten**

De resultaten van de berekeningen zijn in dit hoofdstuk vergeleken met de effecten van WKO-systemen, waarbij aandacht wordt besteed aan de energiebalans die nu door de vergunningverleners geëist wordt. De vraag is hierbij in hoeverre in stedelijk gebied een netto warmteonttrekking kan worden gebruikt om daarmee de autonome opwarming van de ondergrond te compenseren.

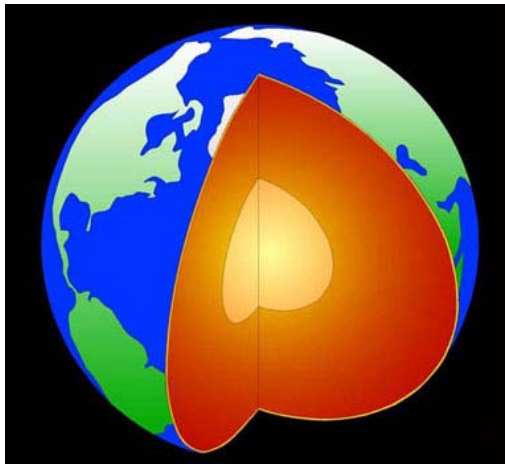
#### 1.2.1 Bestaande kennis

*Ananda Floris en Benno Drijver*

## 1.3 Bepalende factoren voor de bodemtemperatuur

### 1.3.1 Geothermische gradiënt

In de kern van de aarde komt warmte vrij door radioactief verval en is sprake van hoge temperaturen. Als gevolg van het temperatuurverschil met het aardoppervlak treedt warmtegeleiding op vanuit de aardkern naar het aardoppervlak. De temperatuur in de ondergrond neemt daardoor toe met de diepte. De geothermische gradiënt geeft aan hoe snel deze temperatuurtoename plaatsvindt.



**figuur 1.1** De temperatuur in de kern van de aarde is hoog als gevolg van warmteproductie door radioactief verval

Als de warmteflux vanuit de diepte de enige warmtebron is, de temperatuur aan de oppervlakte constant is en geen warmtetransport door grondwaterstroming plaatsvindt, dan is de temperatuurgradiënt alleen afhankelijk van de warmteflux en het warmtegeleidingsvermogen van de ondergrond. Wij gaan er van uit dat de warmteflux vanuit de diepte constant is (op de tijdschaal waarop wij ons in deze studie concentreren) en in dat geval bepaalt alleen het warmtegeleidingsvermogen de geothermische gradiënt.

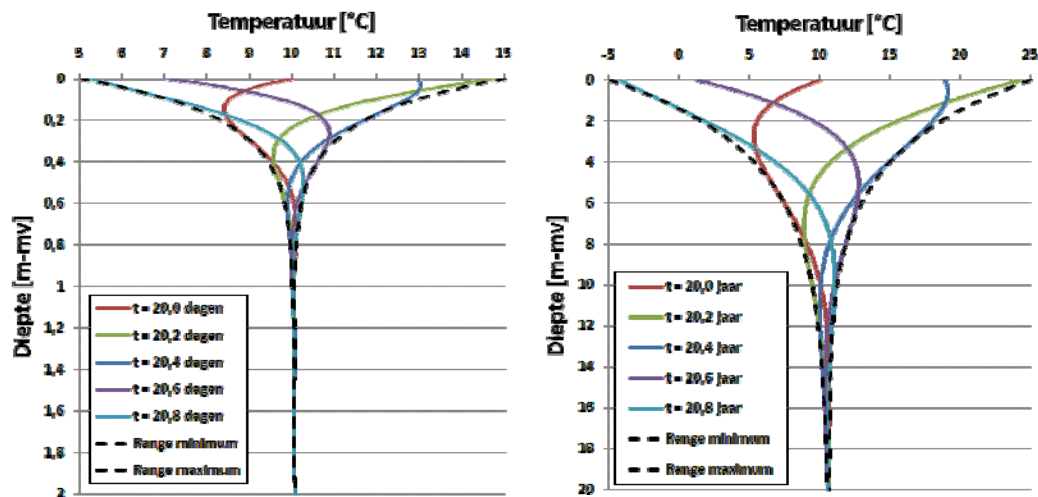
Het gedeelte van de Nederlandse ondergrond dat wordt gebruikt voor WKO, bestaat voornamelijk uit sedimenten met een warmtegeleidingcoëfficiënt van 2 à 3 W/(m °C). Dit betekent dat bij benadering sprake is van een lineaire toename van de bodemtemperatuur met de diepte. Metingen geven aan dat de geothermische gradiënt in Nederland ongeveer 0,03 °C/m bedraagt, wat betekent dat de temperatuur in de diepte met ongeveer 3 °C per 100 m toeneemt. Uit de gemeten temperatuurgradiënt en de warmtegeleidingcoëfficiënt kan voor Nederland een gemiddelde warmtestroom worden berekend van ongeveer  $(0,03 \text{ °C/m} * 2,5 \text{ W/(m °C)}) = 0,075 \text{ W/m}^2$ .

### 1.3.2 Oppervlaktetemperatuur

Op basis van alleen de warmteproductie in de kern van de aarde zou sprake zijn van een vrijwel lineair oplopende temperatuur met de diepte. De temperatuur aan de oppervlakte vormt hierbij de randvoorwaarde aan de bovenzijde. In tegenstelling tot de aanname in de voorgaande paragraaf is de temperatuur aan de oppervlakte niet constant. Zowel op de korte termijn (dagelijkse fluctuatie) als de langere termijn (jaarlijkse fluctuatie en langjarige temperatuurontwikkeling) varieert de temperatuur. Bij een toename van de temperatuur aan de oppervlakte zal ook de bodemtemperatuur toenemen en bij een afname van de temperatuur koelt ook de bodem af.



Doordat de bodem een zekere warmtecapaciteit heeft, is bij een plotselinge verandering van de gemiddelde temperatuur aan de oppervlakte tijd nodig voordat deze temperatuurverandering ook op grotere diepte effect heeft. De dagelijkse temperatuurfluctuatie is hierdoor slechts tot 1 m diepte merkbaar in de bodemtemperatuur en de jaarlijkse fluctuatie tot ongeveer 15 m diepte (zie figuur 1.2).



**figuur 1.2** Berekende temperaturen in de ondergrond onder invloed van de dagelijkse (links;  $10 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) en de jaarlijkse (rechts;  $10 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) sinusvormige temperatuurfluctuatie. In de berekening is uitgegaan van een warmtegeleidingscoëfficiënt van  $3 \text{ W}/(\text{m }^\circ\text{C})$  en een warmtecapaciteit van  $2,4 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C})$

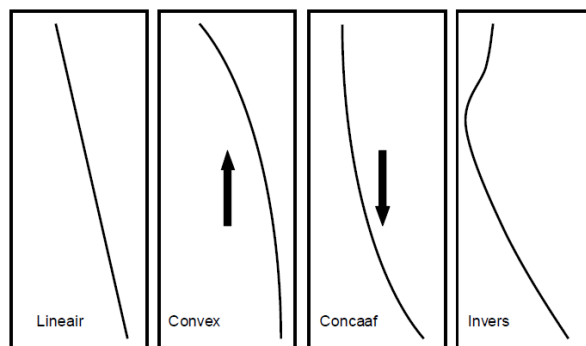
Bij een blijvende of in de tijd oplopende temperatuurverandering aan de oppervlakte zal deze temperatuurverandering langzaam maar zeker tot steeds grotere diepte van invloed worden. De snelheid waarmee de temperatuurtoename zich voortplant, wordt bepaald door de verhouding tussen de warmtegeleidingcoëfficiënt en de warmtecapaciteit. Dieper dan 20 m-mv zijn (WKO systemen buiten beschouwing gelaten) alleen de invloeden van langjarige temperatuursveranderingen merkbaar, zoals klimaatverandering en verandering in landgebruik.

In dit onderzoek hebben wij ons toegelegd op de vraag welke andere factoren op de lange termijn van invloed zijn op de bodemtemperatuur in gebieden waar WKO wordt toegepast. Aangezien het overgrote deel van de WKO-systemen zich in stedelijk gebied bevindt, richt dit rapport zich op de lange termijn effecten die in stedelijke gebieden optreden. Het gaat hierbij om de opwarming die het gevolg is van klimaatverandering en verstedelijking.

### 1.3.3 Grondwaterstroming

In de situatie zonder grondwaterstroming is de temperatuurgradiënt in de diepte lineair. Bij een opwaarts gerichte grondwaterstroming wordt de warmte vanuit de diepte versneld naar de oppervlakte verplaatst. Doordat de oppervlaktetemperatuur een vaste bovengrandsvoorwaarde vormt, ontstaat bij een opwaartse grondwaterstroming een convex temperatuurprofiel (zie figuur 1.3). Infiltrerend water geeft een relatief lage bodemtemperatuur, zodat bij een neerwaarts gerichte grondwaterstroming een concaaf profiel ontstaat.

Een invers profiel ontstaat als aan de oppervlakte (langdurige) opwarming is opgetreden die zich nog niet tot grote diepte heeft kunnen voortplanten, bijvoorbeeld na het realiseren van stedelijke bebouwing in een voormalig landbouwgebied.



**figuur 1.3** Typen temperatuurprofielen

- Lineair : geen grondwaterstroming, constante temperatuur aan de oppervlakte
- Convex : opwaartse grondwaterstroming
- Concaaf : neerwaartse grondwaterstroming
- Invers : langdurige opwarming aan de oppervlakte

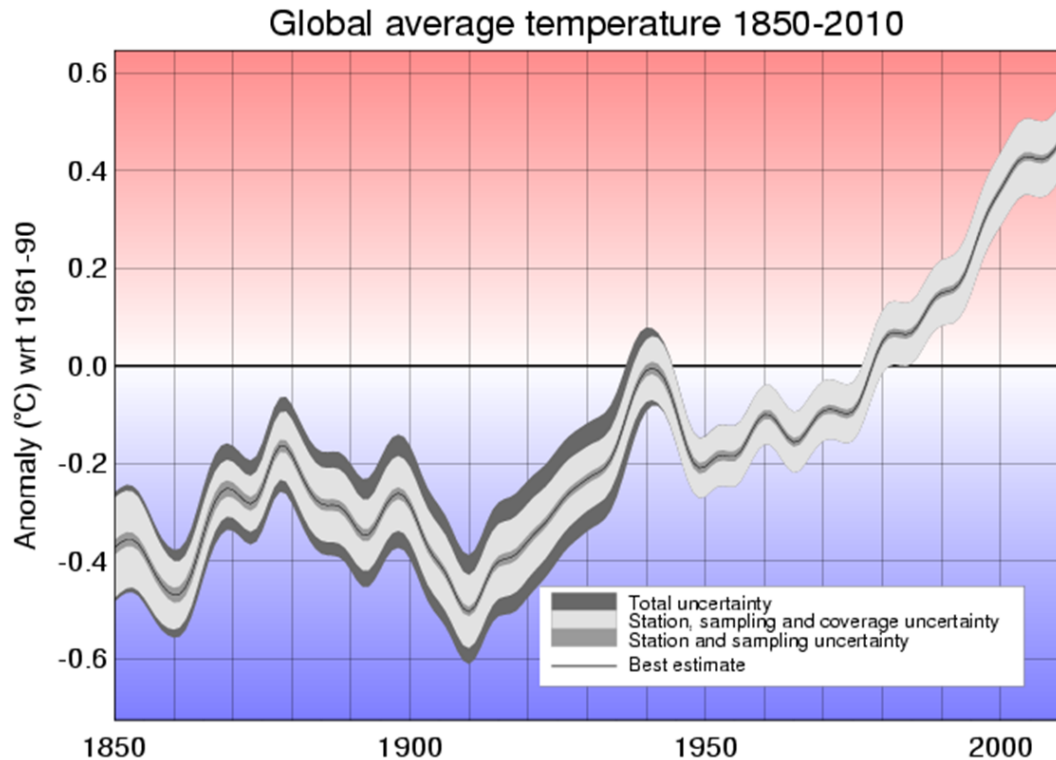
De grootschalige bemaling van polders, vanwege de lage ligging van grote delen van Nederland (onder de zeespiegel), heeft waarschijnlijk ook invloed op de bodemtemperatuur. Zowel vanwege de wijziging van de gemiddelde oppervlaktetemperatuur bij drooglegging, als vanwege de invloed op de grondwaterstroming. De omvang en gevolgen van deze invloed zijn echter nog niet onderzocht. Aangezien dit effect niet specifiek is voor stedelijke gebieden, is hier in dit rapport niet op in gegaan.

## 1.4 Opwarming door klimaatverandering

Het klimaat in Nederland verandert. De mate hiervan is afhankelijk van de wereldwijde temperatuurstijging en van veranderingen in de stromingspatronen van de lucht en de daarmee samenhangende veranderingen in de wind. In dit hoofdstuk worden de klimaatveranderingen die zijn opgetreden in het verleden en de verwachte klimaatscenario's voor de toekomst beschreven.

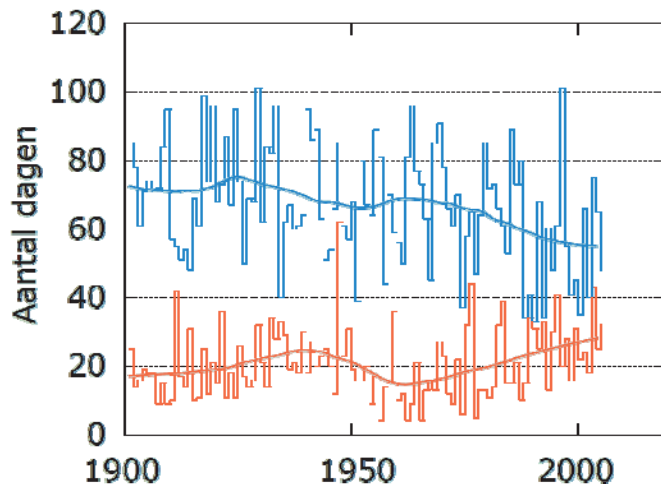
### 1.4.1 Klimaatverandering in het verleden

Sinds 1900 is de temperatuur op aarde gemiddeld met 0,8 °C gestegen (zie figuur 1.4). Een groot deel van deze stijging (ruim 0,5 °C) is opgetreden na 1975.

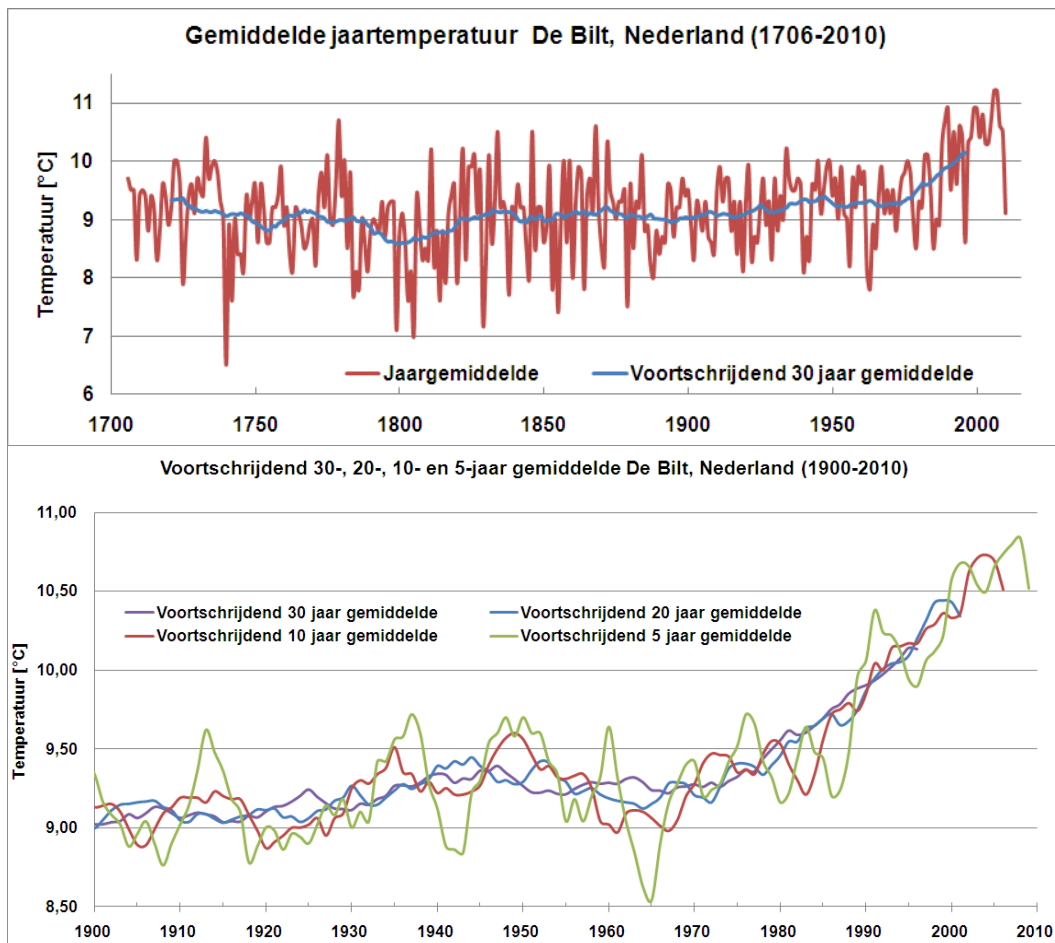


**figuur 1.4** Afwijking van de gemiddelde jaartemperatuur op aarde (1850-2010) ten opzichte van het gemiddelde over 1961-1990. Bron: CRU/UKMO, naar Brohan, 2006

In Nederland is de temperatuur sinds 1900 met gemiddeld 1,7 °C gestegen zoals weergegeven in figuur 1.6. Hierin staan de KNMI gegevens van de jaargemiddelden van de Bilt over de periode 1706 tot en met 2010. De stijging van de temperatuur resulteerde in een afname van het aantal vorstdagen en een toename van het aantal zomerse dagen (zie figuur 1.5). De top tien van warmste jaren sinds 1900 bestaat volledig uit jaren na 1988.



**figuur 1.5** Aantal vorstdagen (blauw) en zomerse dagen (max. temperatuur > 25 °C; oranje) in De Bilt tussen 1900 en 2005. De dikke gekleurde lijnen volgen de voortschrijdende 30-jaar gemiddelden (Bron: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl))



figuur 1.6 Verloop van de gemiddelde jaartemperatuur in De Bilt en voortschrijdende gemiddelde temperaturen in De Bilt. Bron temperatuurdata: KNMI

Uit de KNMI temperatuurdata blijkt dat vooral februari en maart de afgelopen 20 jaar aanzienlijk warmer zijn geworden. Naast 'global warming' wordt dit veroorzaakt door een toename van het aantal dagen waarop de wind uit het zuidwesten waait. Onduidelijk is of de toename van warme zuidwestenwind in februari en maart deels samenhangt met menselijke invloed op het klimaat of dat die verandering uitsluitend wordt veroorzaakt door natuurlijke schommelingen.

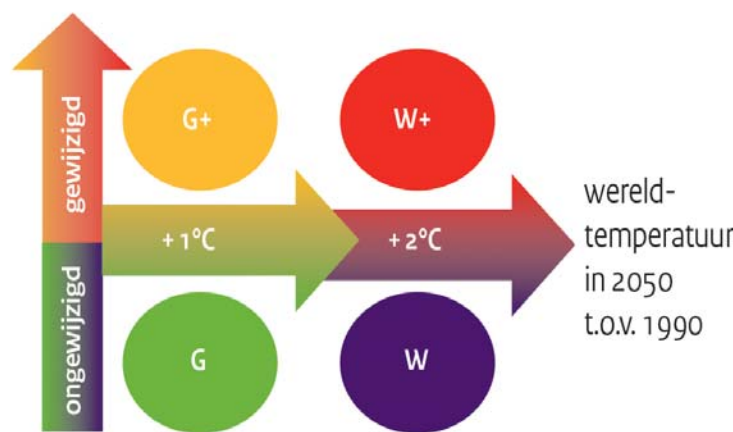
#### 1.4.2 Verwachting klimaatverandering in de toekomst

Klimaatscenario's zijn consistente en waarschijnlijke beelden van een mogelijk toekomstig klimaat. Het KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut) heeft klimaatscenario's ontwikkeld om verkennende studies mogelijk te maken naar de effecten van klimaatverandering, zodat daarop geanticipeerd kan worden.

Klimaatscenario's schetsen een beeld over toekomstige weersgemiddelden en de kans op extreem weer in de toekomst. De meest recente – door het KNMI – ontwikkelde klimaatscenario's zijn de KNMI'06 klimaatscenario's (KNMI, Klimaat in de 21e eeuw, vier scenario's voor Nederland, 2006) die een beeld geven van de veranderingen in temperatuur, neerslag, wind en zeespiegel voor een periode van 30 jaar. Het door het KNMI gekozen basisjaar 1990 wordt beschreven met gemiddelden van gegevens over de periode 1976-2005. De scenario's voor 2050 zijn representatief voor klimaatverwachting in de periode 2036-2065.

De KNMI'06 klimaatscenario's zijn aan de hand van analyses van uitkomsten van computermodellen en meetreeksen opgesteld. Deze computermodellen worden door wetenschappers gebruikt om de menselijke invloed op het wereldwijde en regionale klimaat te onderzoeken. Uitgangspunt in de klimaatscenario's van het KNMI zijn de projecties voor de mondiale temperatuurstijging, zoals opgesteld door het IPCC (Intergouvernamenteel Panel on Climate Change: organisatie die is ingesteld door de Verenigde Naties om de huidige wetenschappelijke, technische en sociaaleconomische kennis over de opwarming van de aarde te beoordelen en samen te vatten). De uitgangspunten van het IPCC zijn gebaseerd op wetenschappelijke artikelen over de opwarming van de aarde, die zijn gepubliceerd tot 2007 (in gereviewde tijdschriften).

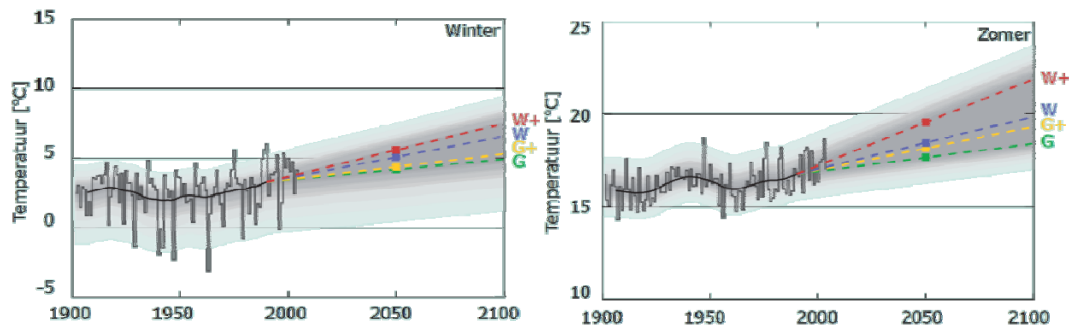
De KNMI'06 scenario's geven een beeld van klimaatverandering in Nederland rond 2050 en 2100 ten opzichte van 1990. Er zijn 4 scenario's ontwikkeld die samen de meest waarschijnlijke veranderingen (met bijbehorende onzekerheden) voor verschillende klimaatvariabelen beschrijven, zoals temperatuur, neerslag, wind en zeeniveau (figuur 1.7).



**figuur 1.7** Indeling van de vier KNMI'06 klimaatscenario's. De G-scenario's gaan uit van een mondiale temperatuurstijging van 1 °C en de W-scenario's gaan uit van een temperatuurstijging van 2 °C. De G+/W+-scenario's beschrijven de klimaatverandering er van uitgaande dat de luchtstromingspatronen ook veranderen (KNMI, 2009; KNMI, 2006)

De scenario's verschillen in de mate waarin de mondiale temperatuur stijgt (G/G+: +1 °C; W/W+: +2 °C) en de mate waarin de luchtstromingspatronen boven de Atlantische oceaan en West-Europa veranderen. De veranderingen in de luchtstromingspatronen veroorzaken extra warme en natte winters, terwijl de zomers extra warm en droog zijn (G+/W+: veranderingen in luchtstroming hebben grote invloed; G/W: kleine invloed verandering in luchtstroming).

Hoewel Nederland regionale en lokale verschillen in het klimaat kent, gaan de KNMI'06 scenario's niet in op regionale of lokale klimaatverandering zoals het stedelijk warmte-eiland. Onderstaande figuren geven de verwachte temperaturen tot 2100 weer voor de verschillende KNMI'06 scenario's.



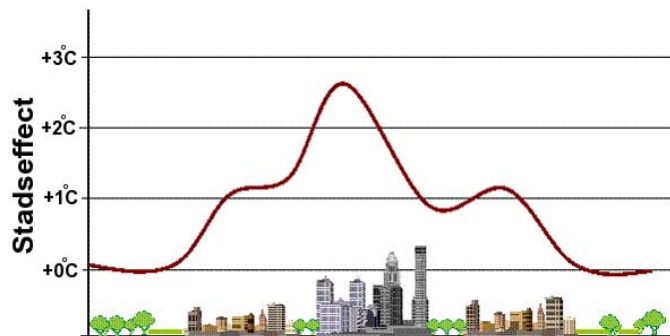
**figuur 1.8** Gemiddelde winter- en zomertemperatuur in De Bilt tussen 1900 en 2100, en de vier klimaatscenario's voor 2050 (gekleurde stippen). De dikke zwarte lijn volgt het voortschrijdend 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen. De gekleurde stippellijnen verbinden elk klimaatscenario met het basisjaar 1990. De grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie die is afgeleid uit de waarnemingen (KNMI, 2006)

De klimaatscenario's van het KNMI geven verwachte mondiale temperatuurstijgingen van 1 tot 2 °C in 2050. Voor Nederland bedraagt de voorspelde gemiddelde temperatuurstijgingen voor de winter 0,9 tot 2,3 °C en voor de zomer 0,9 tot 2,8 °C. De jaargemiddelde temperatuurstijging ligt op basis hiervan tussen 0,9 en 2,55 °C. In de G+/W+-scenario's zal de totale hoeveelheid neerslag afnemen, met in de zomer minder neerslag, maar in de winter meer. In de G/W-scenario's zal de totale hoeveelheid neerslag toenemen, voornamelijk in het zomerseizoen. In alle gevallen zullen zich meer extreme regenbuien voordoen.

De vier KNMI'06 scenario's geven een sterkere stijging van de temperatuurextremen dan van de gemiddelde temperaturen. Rond 2050 stijgt de laagste temperatuur per jaar in de wintermaanden variërend van 1,0 °C tot 2,9 °C, en in de zomermaanden stijgt de hoogste temperatuur per jaar met 1,0 °C tot 3,8 °C ten opzichte van het klimaat rond 1990. Vooral in de scenario's G+ en W+ stijgen de extremere temperaturen sterker. In de winter treden in de '+' scenario's frequenter westenwinden op. In combinatie met de mondiale temperatuurtoename zorgt dit voor een relatief sterke afname van het aantal vorstdagen (minimumtemperatuur < 0 °C) en ijsdagen (maximumtemperatuur < 0 °C) in deze scenario's ten opzichte van de scenario's zonder verandering in luchtstromingspatronen (G en W). In de zomer treden in de G+ en W+ scenario's juist frequenter oostenwinden op. In combinatie met de mondiale temperatuurtoename zorgt dit voor een relatief sterke toename van het aantal tropische dagen (maximumtemperatuur ≥ 30 °C), zomerse dagen (maximumtemperatuur ≥ 25 °C) en warme dagen (maximumtemperatuur ≥ 20 °C) in deze scenario's ten opzichte van de scenario's zonder verandering in luchtstromingspatronen (G en W).

## 1.5 Opwarming door verstedelijking

Het stedelijk warmte-eiland of 'Urban Heat Island' (UHI) is het fenomeen dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan in het omliggende niet-stedelijk gebied, zoals weergegeven in figuur 1.9.



figuur 1.9

Schematische weergave van het temperatuurverschil tussen de stad en het buitengebied (Bron: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl))

### 1.5.1 Oorzaken

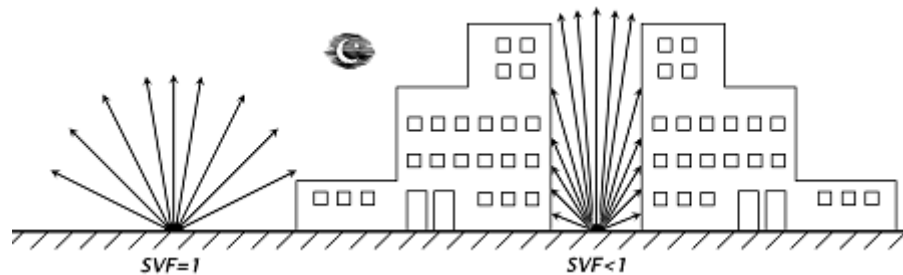
Het temperatuurverschil tussen stedelijk en niet-stedelijk gebied kan oplopen tot enkele graden en is 's nachts het grootst. Oorzaken van het temperatuurverschil in een stedelijk warmte-eiland zijn (Stolk, 2000):

#### *Inkomende straling*

Inkomende (zonne)straling zorgt voor opwarming en dus voor hogere temperaturen. Ten opzichte van het niet stedelijke gebied bereikt in de stad een relatief groot deel van de inkomende straling de grond. In bebouwd gebied wordt de straling gereflecteerd door de loodrechte wanden van de bebouwing en bereikt zo alsnog de grond, terwijl de vegetatie in het omringende gebied meer straling terugkaatst. Als de bebouwing te hoog wordt kan de straling de grond niet meer bereiken, daarom is dit effect het sterkst bij bebouwing met platte daken van 2 à 3 verdiepingen.

#### *Uitgaande straling*

De balans tussen de ingaande en uitgaande straling is een bepalende factor voor de temperatuur. De temperatuur daalt als de uitgaande straling groter is dan de ingaande straling en stijgt als de ingaande straling groter is dan de uitgaande straling. Daarom stijgt de temperatuur overdag en daalt de temperatuur 's nachts. In stedelijk gebied wordt de uitgaande straling, die voor afkoeling moet zorgen, gehinderd door gebouwen. Dit effect is het sterkst bij hoge gebouwen (zie figuur 1.10).



**figuur 1.10** Nachtelijke uitstraling kan in een open landschap ongehinderd optreden (hoge 'sky view factor' (SVF)) en wordt bij dichte en hoge bebouwing (lage SVF) sterk gehinderd. Bron: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)

### *Verdamping*

Aangezien verdamping energie kost heeft verdamping een verkoelend effect en is de mate waarin verdamping optreedt van belang voor de temperatuur. Op het platteland en in natuurgebieden treedt verdamping vooral op via de vegetatie. In stedelijk gebied is over het algemeen relatief weinig vegetatie aanwezig en is de verdamping veel minder dan in de omgeving. Daarnaast wordt het neerslagwater in stedelijk gebied snel afgevoerd via de riolering, waardoor dit water niet meer beschikbaar is voor verdamping.

### *Interne warmteproductie*

Ook het energieverbruik in stedelijke gebieden zorgt voor extra warmteproductie en leidt daarom tot opwarming. Hierbij moet worden gedacht aan het verbruik van energie in woningen, kantoren, andere gebouwen en de industrie (aardgas, elektriciteit, steenkool) en door het verkeer (olie). Opgemerkt wordt, dat ook bij het verbruik van elektriciteit warmte vrij komt. Zo is bijvoorbeeld bekend dat de verhoogde temperaturen in steden gedurende de zomer de elektriciteitsvraag voor koeling vergroten, wat voor extra warmteproductie zorgt en een (geringe) toename van het UHI-effect.

### *Warmtecapaciteit*

De warmtecapaciteit geeft aan hoe veel energie nodig is om een bepaald volume van een zeker materiaal met 1 graad op te warmen of af te koelen. Materialen met een hoge warmtecapaciteit koelen veel langzamer af dan materialen met een lage warmtecapaciteit en houden de warmte dus langer vast. Doordat de warmtecapaciteit van stedelijk bouw materiaal is groter dan van vegetatie, wordt de warmte in stedelijk gebied langer vastgehouden dan in het omringende niet-stedelijke gebied en is de temperatuur vooral 's nachts duidelijk hoger.

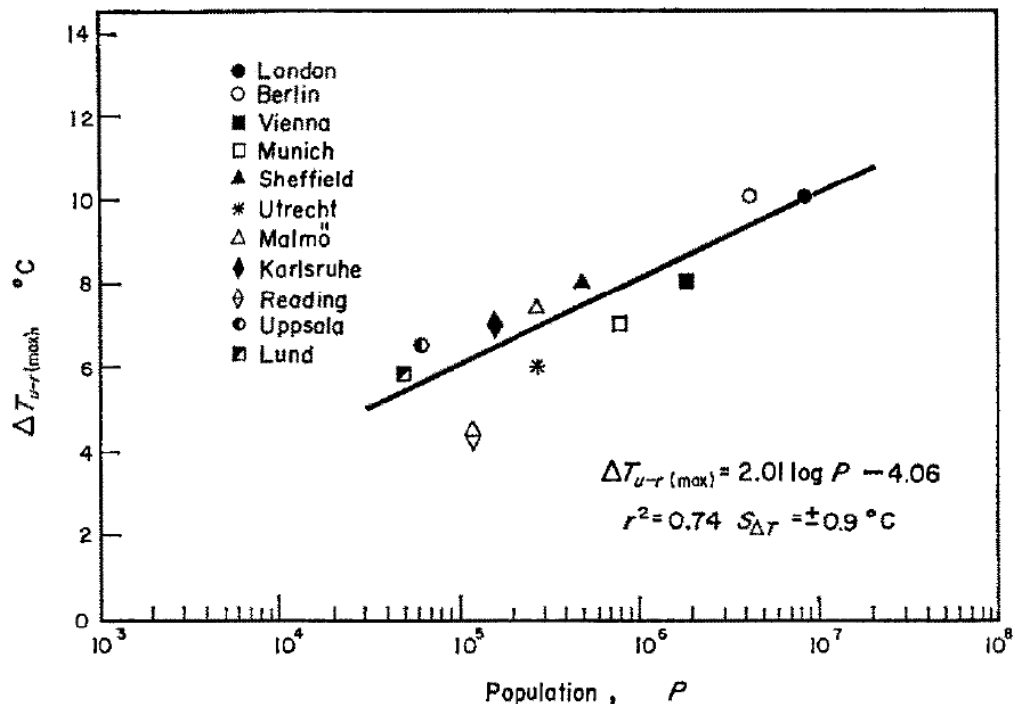


### Windsnelheid

Doordat de temperatuur buiten het stedelijk gebied meestal lager is dan in het stedelijk gebied kan de wind voor de aanvoer van koelere lucht zorgen en het stedelijk warmte-eiland effect verkleinen. De bebouwing in steden heeft ook een invloed op de wind. Hoge gebouwen zorgen voor grote ruimtelijke verschillen in windrichting en windsnelheid. Bovendien kan de wind rond deze gebouwen versnellingen ondergaan die ertoe leiden dat de windsnelheden groter worden dan gemeten in de landelijke omgeving. Aan de ander kant zorgt lage bebouwing ervoor dat de wind bij het aardoppervlak sterker afneemt dan boven de landelijke omgeving. Hierdoor mengt de lucht dichtbij het oppervlak minder goed met de bovenliggende lucht dan op het platteland het geval is (provincie Utrecht, 2008).

### 1.5.2 Omvang van het effect

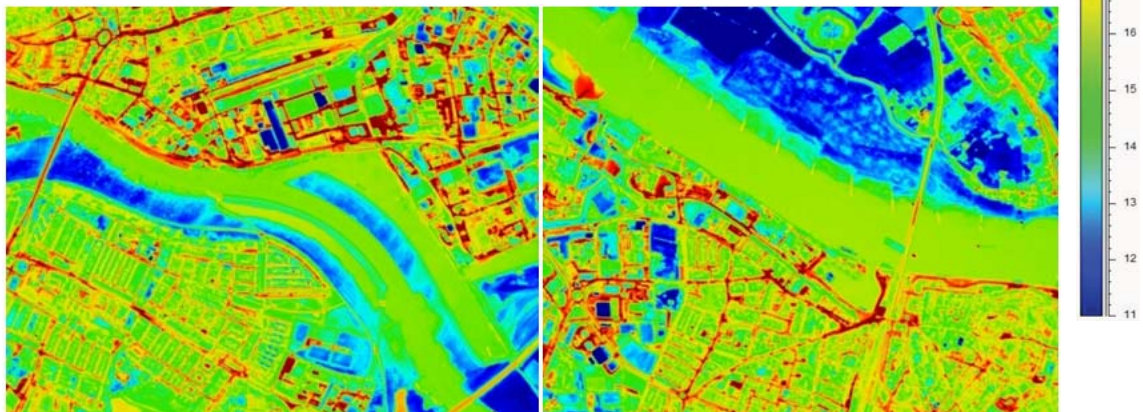
Over het effect van het stedelijk warmte eiland zijn (in het buitenland) reeds veel onderzoeken gepubliceerd. In de 19<sup>e</sup> eeuw is het UHI-effect voor het eerst gedocumenteerd door Howard (1833), en later verder geanalyseerd door Oke (1973) en Landsberg (1981). Sindsdien is er wereldwijd veel onderzoek gedaan met verschillende methodes. Oke (1973) en Karl et al. (1988) suggereren een verband tussen het inwonersaantal van de stad en de omvang van het UHI-effect (zie figuur 1.11).



figuur 1.11 Relatie tussen het inwonersaantal en het maximale temperatuurverschil tussen het stedelijk en landelijk gebied voor steden in Europa (Oke, 1973)

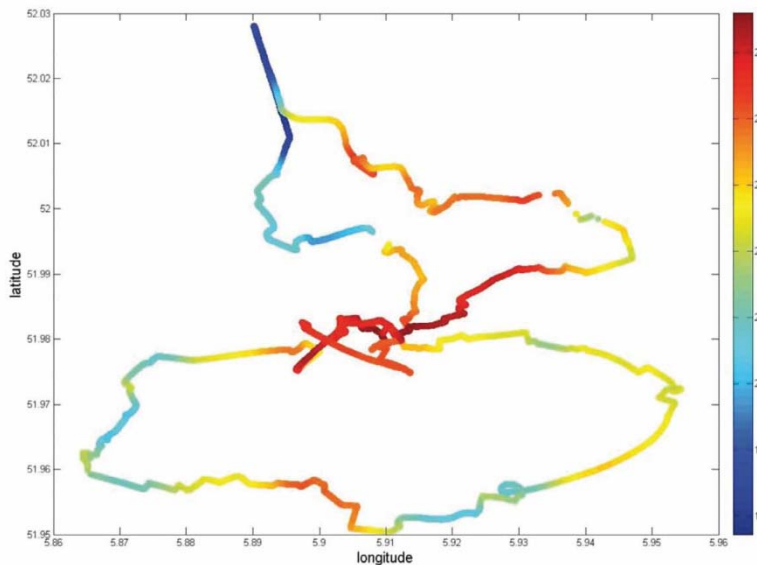
Uit recent onderzoek blijkt echter dat binnen het stedelijk gebied sprake is van een grote ruimtelijke variatie in de temperatuur (zie o.a. Ferguson en Woodbury, 2007), waardoor de benadering op basis van het inwoneraantal te eenvoudig is om de effecten goed te kunnen beschrijven.

De grote variatie binnen stedelijke gebieden wordt direct duidelijk uit satellietbeelden of beelden gemaakt vanuit vliegtuigen, die zijn gebruikt om de oppervlaktetemperatuur te bepalen. Dit is onder andere in Arnhem en Nijmegen gedaan op 6 augustus 2009. Vanuit een vliegtuig zijn op 4 kilometer hoogte infraroodbeelden gemaakt (zie figuur 1.12).



**figuur 1.12** De “hittescan” van een deel van Arnhem met de Nelson Mandelabrug en John Frostbrug (links) en een deel van Nijmegen met onder andere de Waalbrug (rechts). Bron: [www.alterra.wur.nl](http://www.alterra.wur.nl)

Op de gemaakte infraroodbeelden springen de hete plekken in Arnhem en Nijmegen er duidelijk rood uit. Met name de (asfalt)wegen hebben een hoge oppervlaktetemperatuur. In de uiterwaarden is de temperatuur het laagst; lager dan de temperatuur van het rivierwater. Binnen het stedelijk gebied is het verschil tussen de minimale en maximale temperatuur groter dan de temperatuurschaal aangeeft: naar schatting ongeveer 10 °C. Vervolgens zijn ook temperatuurmetingen uitgevoerd door met twee bakfietsen, ingericht als mobiel weerstation, rond te rijden in Arnhem. De resultaten van de bakfietsmetingen zijn in figuur 1.13 weergegeven en duiden op temperatuurverschillen tot 7 °C tussen de “groene gebieden” en de “stenige gebieden” in de stad.



**figuur 1.13**  
**Resultaten van**  
**temperatuurme-**  
**tingen op 19**  
**augustus 2009**  
**met mobiele**  
**weerstations,**  
**gemonteerd op**  
**twee bakfietsen**

### Verschillende definities UHI

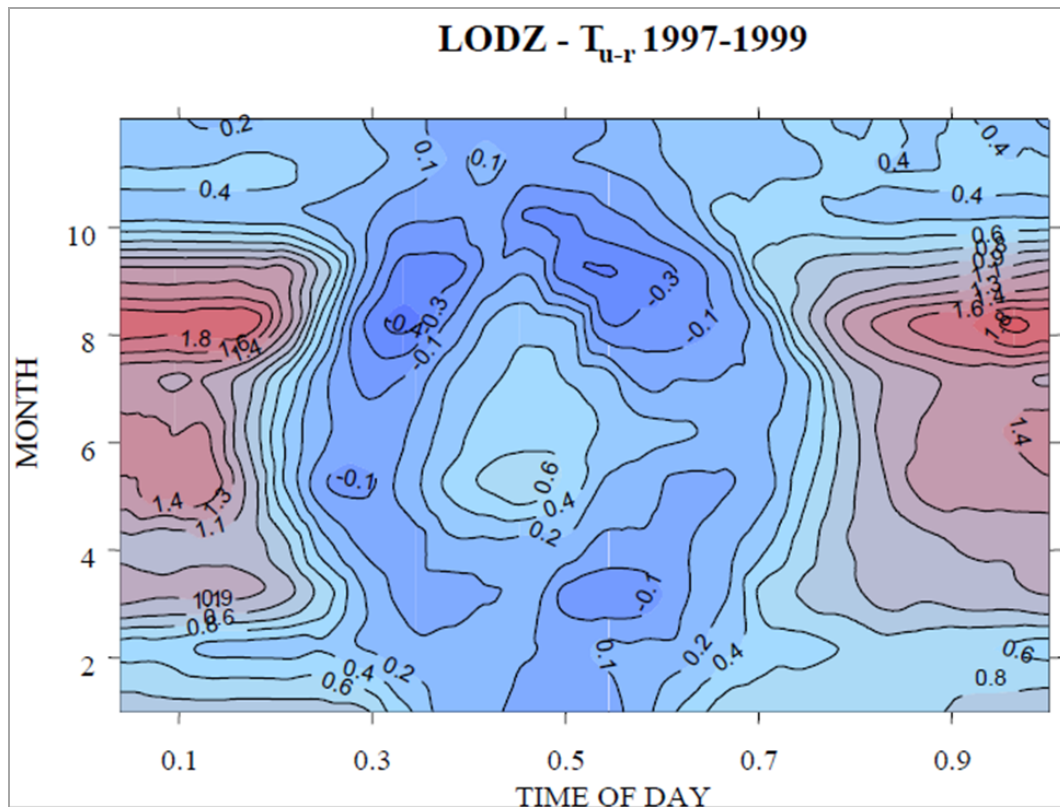
De grootte van het UHI-effect kan op verschillende manieren worden gedefinieerd, waardoor de getallen niet direct vergelijkbaar zijn. Het maximale verschil tussen de temperatuur in het stedelijke gebied en het omringende landelijke gebied kan bijvoorbeeld van belang zijn voor aspecten die met de gezondheidszorg samenhangen (zie bv. Schwartz en Seppelt, 2009). Zo is bijvoorbeeld bekend dat bij hoge temperaturen het aantal sterfgevallen ook stijgt. Verschillende onderzoeken definiëren het UHI-effect dan ook als het maximale verschil tussen de stad en de omgeving (zoals bijvoorbeeld Oke, 1973). Daarnaast wordt niet alleen onderzoek gedaan naar de temperatuurverschillen nabij de grond (Canopy Layer Heat Island), maar ook op grotere hoogte in de atmosfeer (Boundary Layer Heat Island).

Een onderzoek naar het UHI-effect in meer dan 200 Europese steden (Schwartz en Seppelt, 2009) maakt gebruik van de satellietbeelden van 22.30 uur, waarvan voor een periode van 8 dagen in juli 2002 het gemiddelde is genomen. Het UHI-effect is vervolgens berekend door de standaard deviatie te nemen van de oppervlaktetemperatuur binnen de gemeentegrenzen van de betreffende stad. Dit kan in bepaalde gevallen tot een onderschatting van het effect leiden als binnen de gemeentegrenzen niet of nauwelijks platteland aanwezig is. In het onderzoek zijn geen Nederlandse steden opgenomen. De gevonden bandbreedte voor het UHI-effect in dit onderzoek is 0,5 tot 1,5 °C, met enkele uitzonderingen tot maximaal 2,5 °C.

Voor het onderzoek in het kader van MMB is het langjarige gemiddelde van de oppervlaktetemperatuur van belang. Veel van de gegevens uit de literatuur zijn voor dit doel niet rechtstreeks geschikt.

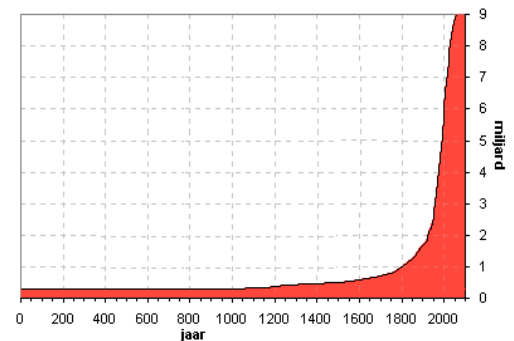
Voogt heeft met behulp van data uit Lodz, Polen (data afkomstig van Klysik&Fortuniak) een model gemaakt van de temperatuurverdeling in de tijd in stedelijk gebied (figuur 1.14). De temperatuurverschillen tussen stedelijke en niet-stedelijke gebieden laten in deze data een duidelijk seizoensafhankelijk patroon zien en ook een duidelijk dagelijks patroon. Het temperatuurverschil tussen stedelijk en niet-stedelijk gebied (het UHI-effect) varieert in dit onderzoek -0.3 tot +1.8 °C (Voogt, Jaar onbekend). Het UHI-effect is het sterkst in de nacht en kan in de ochtend en middag zelfs licht negatief zijn.

Het UHI-effect is het grootst tussen 19.00 uur 's avonds en 05.00 uur 's ochtends in de periode mei-september (zie figuur 1.14). In de winterperiode is het UHI-effect duidelijk kleiner dan in de zomer. Ook is het effect overdag veel kleiner dan 's nachts. Dit geeft duidelijk de relevantie aan van het moment waarop het UHI-effect wordt gemeten.



figuur 1.14 Temperatuurverschil tussen het stedelijk gebied en het omliggende landelijke gebied als functie van de maand (verticale as) en het moment van de dag (horizontale as), zoals berekend voor Lodz, Polen. De berekeningen zijn gebaseerd op metingen in de periode 1997-1999. (Bron: Presentatie Voogt, jaar onbekend. Data afkomstig van Klysik& Fortuniak)

De wereldwijde bevolkingsgroei vertoont een exponentiële groei (figuur 1.15). Bovendien neemt het aandeel van de bevolking dat in stedelijk gebied woont steeds verder toe. Sinds 1800 is het percentage van de wereldbevolking dat in stadsgebieden woont toegenomen van 3% tot meer dan 50%. Volgens voorspellingen zullen in 2030 bijna 5 miljard mensen in de stad wonen op een wereldtotaal van 8,1 miljard (bron: <http://www.seos-project.eu/modules/landuse/landuse-c02-s02-p01.nl.html>), wat overeen komt met ruim 60%. De groei van de stadsbevolking verloopt dus aanmerkelijk sneller dan de groei van de wereldbevolking. Hierbij moet worden opgemerkt dat Europa en Noord-Amerika al sterk verstedelijkt zijn, waardoor de relatieve groei hier veel kleiner is dan bijvoorbeeld in Afrika en Azië.



**figuur 1.15**  
**Wereldbevolking 0-2050**  
 (<http://users.telenet.be/geowisvlio/Aardrijkskunde/bevolking.html>)

Een andere relevante ontwikkeling is het aantal personen per huishouden. In Nederland is dit aantal gedaald van 3,6 in 1960 naar 2,2 in 2009. In combinatie met de bevolkingsgroei is het aantal woningen toegenomen tot 2,5 keer het aantal van 1960, wat overeen komt met een toename van de woningvoorraad met 4 miljoen woningen (Bron: [www.compendiumvoordeleefomgeving.nl](http://www.compendiumvoordeleefomgeving.nl)). Dit alles zorgt voor een groei van de omvang van steden en een versterking van het UHI-effect.

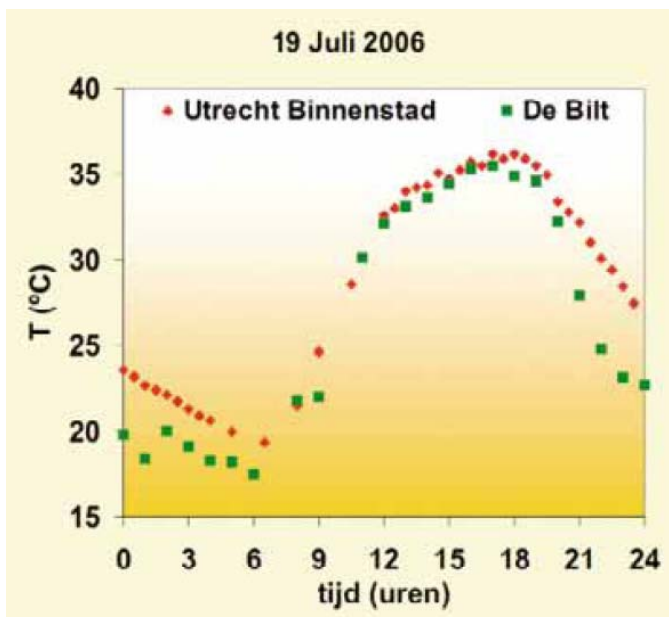
#### *Relevant onderzoek voor de situatie in Nederland*

In Nederland is het UHI-effect pas begin jaren '70 voor het eerst onderzocht. In 1975 is Conrads gepromoveerd aan de Universiteit Utrecht op metingen uitgevoerd in en om de stad Utrecht. De metingen van Conrads laten zien dat vooral de dagelijkse minimumtemperaturen verschillen in stedelijk en niet-stedelijk gebied. In de winter zijn de gemiddelde verschillen tussen de dagelijkse minimum temperaturen 1,7 °C; in de zomer is het gemiddelde verschil 2,7 °C. 's Nachts kan het verschil in minimum temperatuur (stedelijk/niet-stedelijk gebied) oplopen tot 8 °C (Conrads, 1975).

De temperatuurverschillen zijn sinds het onderzoek van Conrads waarschijnlijk groter geworden om een aantal redenen:

- Utrecht is gegroeid (bebouwd gebied is groter geworden);
- Menselijke activiteit is veranderd (meer verkeer en hoger energieverbruik);
- Opgetreden klimaatverandering in de afgelopen 40 jaar kan de omvang van het UHI beïnvloed hebben;
- Bouwstijlen (hoogte, materiaal en dakbedekking) kunnen veranderd zijn waardoor albedo (mate van reflectie van zonlicht) en windpatronen ook veranderen;
- Nederlandse steden liggen relatief dicht bij elkaar en het platteland buiten de steden is continu aan het verstedelijken waardoor de niet-stedelijke gebieden uit het onderzoek van Conrad (1975) nu tot stedelijke gebieden kunnen behoren en ook het UHI-effect ervaren.

Volgens het klimaateffetschetsboek van de provincie Utrecht is de gemiddelde temperatuur in het centrum van de stad Utrecht 1,1 °C hoger dan op het omringende platteland. De bijdrage van de hogere nachtemperaturen is hierbij ongeveer vier keer zo groot als die van de hogere temperaturen overdag (provincie Utrecht, 2008). De grootte van het temperatuurverschil tussen de stad en het omringende platteland is verder sterk afhankelijk van de weersomstandigheden; voor een stad als Utrecht bijvoorbeeld kan 's nachts bij helder weer en windstilte, het maximale temperatuurverschil tussen het centrum van de stad en het omringende platteland oplopen tot meer dan 5 °C (zie figuur 1.16). Bij bewolkte omstandigheden met veel wind zijn de verschillen echter verwaarloosbaar.



**figuur 1.16**  
**Resultaten van temperatuurmetingen in het centrum van Utrecht en in het landelijke gebied van De Bilt op 19 juli 2006. Bron: [www.klimaatonderzoeknederland.nl](http://www.klimaatonderzoeknederland.nl)**

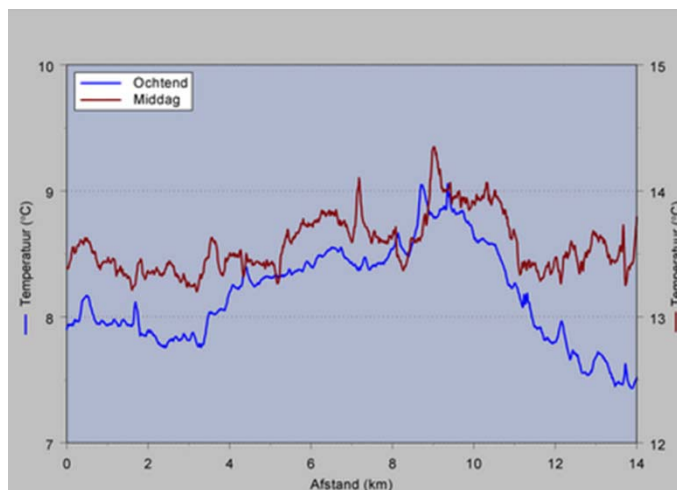
Het KNMI verricht doorgaans geen metingen in stedelijk gebied vanwege het heterogene karakter waardoor de variabiliteit op kleine schaal zo groot is dat het niet goed mogelijk is om daar representatieve metingen te verrichten. Het KNMI heeft onderzoek gedaan naar de invloed van het stedelijk warmte-eiland van Utrecht op de temperatuur in De Bilt (Brandsma, 2003), aangezien dat relevant kan zijn voor de interpretatie van de meetreeksen van de temperatuur in De Bilt.

In navolging van Conrads (1975) die in de winter van 1969/1970 gedurende een periode van 90 dagen mobiele luchttemperatuurmetingen verrichtte langs twee dwarsprofielen die tweemaal daags werden gemeten (vanaf 's ochtends 07:30 uur en 's middags 13:00 uur) heeft Brandsma voor zijn onderzoek in de periode maart 2006-januari 2009 gekozen voor een dwarsprofiel Nieuwegein-Utrecht-De Bilt (zie figuur 1.17). Deze kunnen gezien worden als een aanvulling op het werk van Conrads. De metingen vonden plaats tijdens woon-werkverkeer 's ochtends vroeg en in de namiddag.



figuur 1.17 Het 14 km lange dwarsprofiel Nieuwegein-Utrecht- De Bilt. Bron: www.knmi.nl

Zoals verwacht laten de gemiddelde profielen voor de ochtendmetingen (voor zonsopkomst) een groter verschil zien tussen het centrum van Utrecht en het omringende gebied dan de metingen in de namiddag. Gemiddeld lopen de verschillen tussen het centrum van Utrecht en het KNMI in De Bilt op tot ongeveer 1.5 °C voor ochtendprofielen in ongeveer 0.6 °C voor de namiddag profielen (zie figuur 1.18).



figuur 1.18 Profielen van de gemiddelde temperaturen die zijn gemeten in de ochtend en middag. De ochtendmetingen laten een groter verschil zien tussen het centrum van Utrecht en het omliggende gebied dan de middagmetingen. Bron: www.knmi.nl

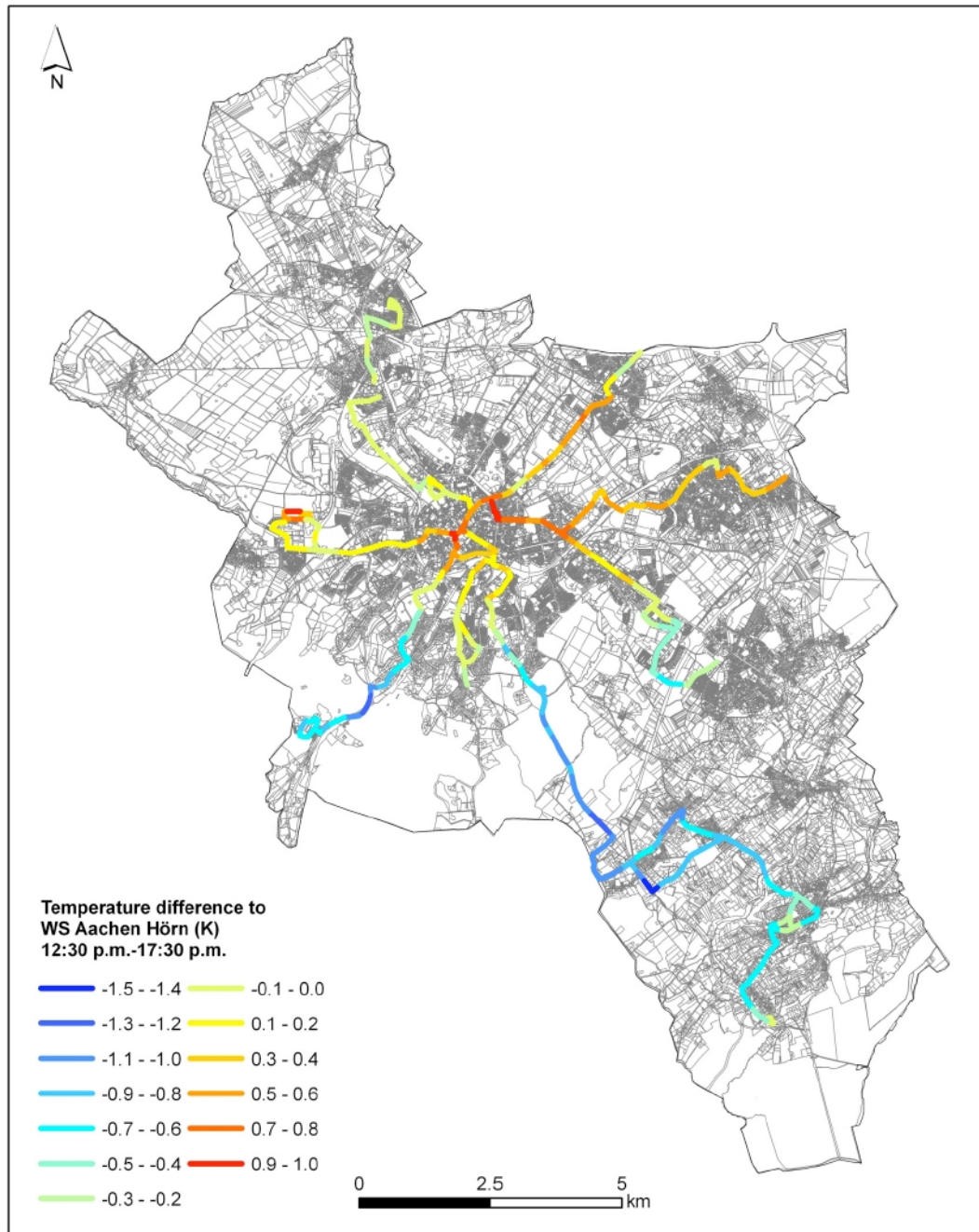
De maximale temperatuurverschillen tussen het centrum van Utrecht en het omliggende gebied zijn veel groter dan gemiddelde verschillen. In het onderzoek van Brandsma (2010) is het maximale temperatuurverschil gedefinieerd als het verschil tussen de mediaan van de twintig hoogste temperaturen en de mediaan van de twintig laagste temperaturen langs het profiel. In de praktijk betekent dit dat de warmste 200 meter van de route wordt vergeleken met de koudste 200 meter van de route.

De drie dagen met de grootste temperatuurverschillen zijn 13 en 15 maart 2007 en 17 februari 2008, met maximale temperatuurverschillen van respectievelijk 5.1, 5.2 en 5.4 °C. Dit is kleiner dan de ongeveer 6.5 °C die op basis van de literatuur (Oke, 1973 e.a.) werd verwacht voor een stad ter grootte van Utrecht. Deze maximale verschillen treden alleen op tijdens heldere, windstille nachten. In de praktijk komen die omstandigheden niet vaak voor. Gemiddeld is het verschil dan ook aanzienlijk kleiner dan het maximale verschil.

Op basis van de uitgevoerde metingen, correcties daarop en eerder uitgevoerd onderzoek (Conrads, 1975 en Brandsma et al, 2003) is voor De Bilt afgeleid dat van de totale gemeten 1,8 °C temperatuurstijging in over de periode 1901-2008 ongeveer 8% is veroorzaakt door verstedelijking (bron: stuk Brandsma op [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)).

In Aken is vergelijkbaar onderzoek gedaan door temperatuursensoren te monteren op stadsbussen (Buttstädt et al, 2010). Figuur 1.19 toont het gemiddelde van de gemeten temperatuurprofielen voor de middag over de 15 dagen waarop is gemeten (tussen half maart 2010 en begin juli 2010). De metingen duiden op verschillen van maximaal 2,5 °C. Hierbij moet worden opgemerkt dat bussen alleen op wegen rijden, waar de temperaturen mogelijk relatief hoog zijn (en de temperatuurverschillen dus enigszins worden onderschat).





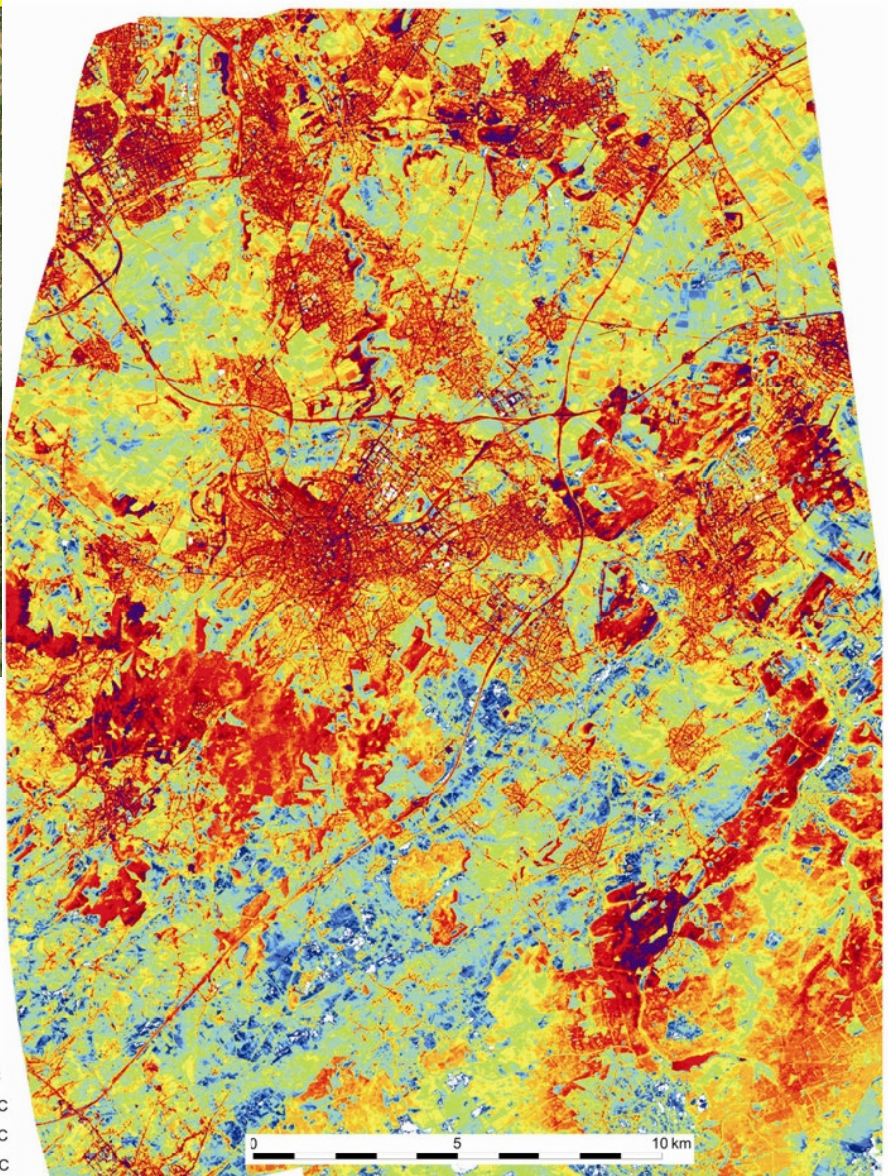
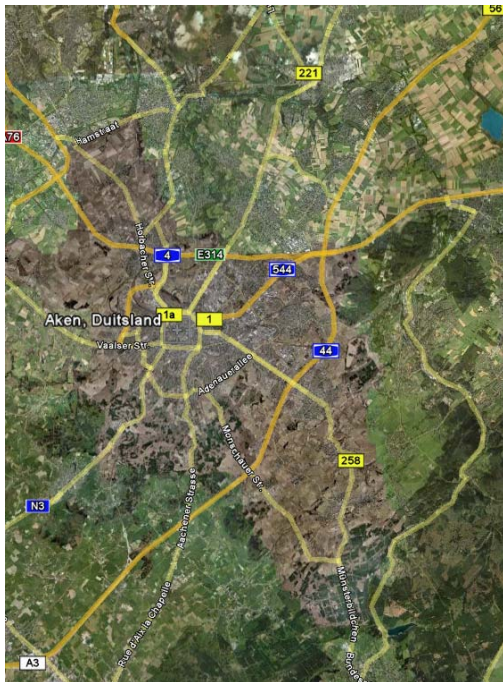
**figuur 1.19** Gemiddelde temperatuur over de 15 dagen dat is gemeten met mobiele weerstations gemonteerd op bussen. Metingen verricht in maart, mei en juni 2010 (Buttstädt et al, 2010)

Tevens zijn van Aken infrarood beelden beschikbaar van 23 september 1998 tussen 20.00 en 21.20 uur (zie figuur 1.20), waaruit duidelijke verschillen tussen het stedelijk gebied en het landelijke gebied in de omgeving naar voren komen (Schneider en Ketzler, 2009). In dit geval is het verschil tussen het stedelijk gebied van Aken (in het centrum 14-16 °C) en het landbouwgebied ten zuiden van Aken (4-6 °C) het grootst. Opvallend zijn de hoge temperaturen die in de bosgebieden te zien zijn. Dit wordt verklaard uit het feit dat relatief veel tijd nodig is om alle warmte die zich overdag onder het bladerdak heeft verzameld af te voeren. Op het tijdstip van de foto is het daardoor nog warm op de hoogte van de boomtoppen.

## Thermalkarte Aachen

23.9.1998, 20:00-21:20 MESZ

Gesamtstädtisches Klimagutachten, Aachen, 2000

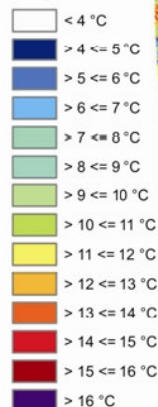


figuur 1.20

Links: Plattegrond landgebruik Aachen (Google Earth).

Rechts: Temperatuurkaart van Aachen en omgeving van 23 september 1998, op basis van infraroodbeelden gemaakt tussen 20.00 en 21.20 uur (Schneider en Ketzler, 2009)

Oberflächentemperaturen



Auftraggeber: Stadt Aachen  
 Fachbereich Umwelt,  
 Abteilung Luftreinhaltung,  
 Energie und Immissionsschutz

Befliegung und Datenaufbereitung:  
 Steinicke & Streifeneder  
 Umweltuntersuchungen  
 Eisenbahnstrasse 43  
 D-79098 Freiburg

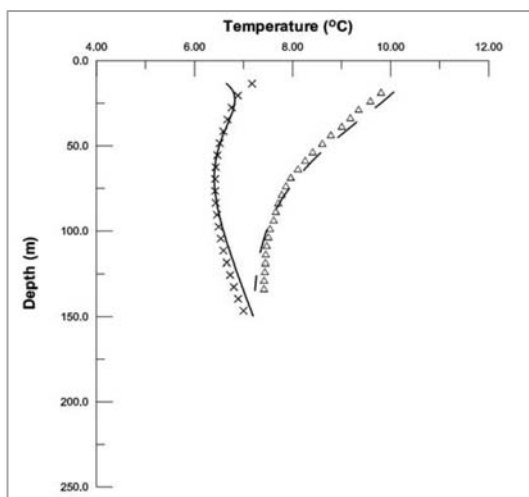
Kartographie:  
 Geographisches Institut  
 der RWTH Aachen

### Oppervlaktetemperatuur

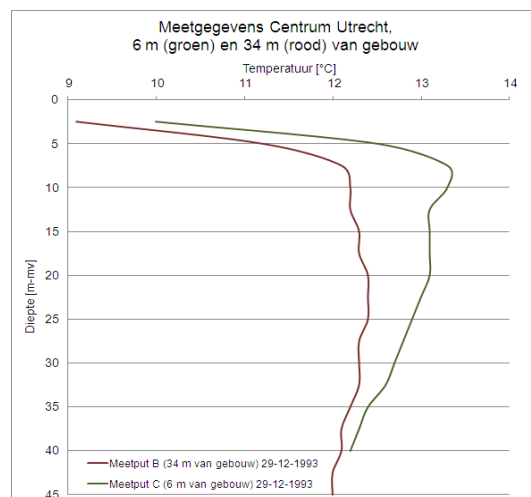
Voor dit onderzoek is de gemiddelde temperatuur van de oppervlakte van belang, omdat die doorwerkt in de temperatuur van de ondergrond. De metingen die in Utrecht zijn verricht naar het stedelijk warmte-eiland betreffen metingen van de luchttemperatuur. Hoewel een sterke correlatie wordt verwacht tussen de luchttemperatuur en de oppervlakte-temperatuur zijn deze waarschijnlijk niet overal gelijk.

De luchtfoto's die zijn gemaakt boven Arnhem en Nijmegen (figuur 1.12) zijn gebaseerd op infrarood metingen. De infrarode straling die een object uitzendt is een maat voor de temperatuur van het object. Deze foto's geven dus informatie over temperatuur van datgene wat vanuit de lucht gezien wordt. Het kan dus gaan om de bodemtemperatuur (grasland, straten, voetpaden), maar ook om de temperatuur van daken van gebouwen en de bovenzijde van de vegetatie. De beelden kunnen worden gebruikt om de verschillen in oppervlaktetemperatuur te bepalen tussen grasland en wegen. In de foto's vallen hierbij de grote verschillen over zeer korte afstanden op. Vooral het verschil tussen een (asfalt)weg en naastgelegen groenvoorzieningen is groot (5 à 10 °C?). Deze verschillen zullen in veel mindere mate optreden in de luchttemperatuur, vooral door de invloed van de wind/luchtstroming.

Het infraroodbeeld van Aken en omgeving (figuur 1.20) toont voor het moment waarop de beelden zijn gemaakt verschillen van orde grootte 10 °C tussen het centrum van Aken en het landbouwgebied zuidelijk van Aken. In het landbouwgebied zuidelijk van Aken is een groot contrast te zien tussen de autosnelweg en de omliggende landerijen, wat aangeeft dat metingen die boven wegen zijn verricht met enige voorzichtigheid moeten worden beschouwd. Om dezelfde reden gaat dit ook op voor de metingen die door Brandsma met de fiets zijn gedaan: ook hier gaat het om metingen boven verharde oppervlaktes, waardoor de laagste temperaturen mogelijk buiten beschouwing blijven.



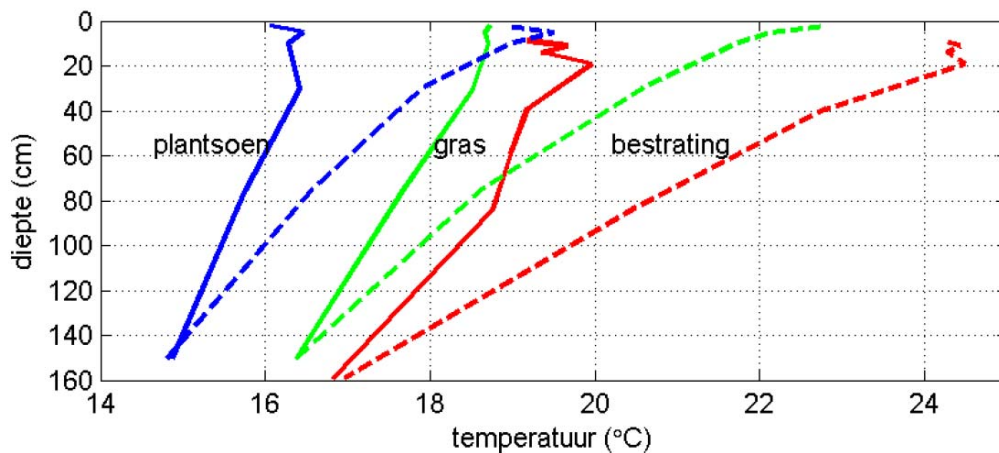
**figuur 1.22** Gemeten (punten) en berekende (lijnen) temperatuurprofielen op 18 m afstand van een gebouw (kruisjes) en op 2 m afstand van een ander gebouw (driehoeken). Bron: Ferguson en Woodbury, 2004



**figuur 1.21** Gemeten temperatuurverloop in de diepte in de meetputten B (34 van gebouw) en C (6 m van gebouw) op 24 september 1998

Ook de temperaturen die heersen onder gebouwen werken door in de bodemtemperatuur en hiervan zijn ons geen metingen bekend. Onderzoek door Ferguson en Woodbury (2004) suggereert dat de bodemtemperatuur op korte afstand van een gebouw aanmerkelijk hoger kan zijn dan op grotere afstand van het gebouw (zie figuur 1.22). Ook de metingen die in het centrum van Utrecht zijn uitgevoerd lijken te duiden op temperatuurverschillen die samenhangen met de afstand tot het gebouw (zie figuur 1.22). Dit geeft aan dat onder gebouwen een relatief hoge gemiddelde temperatuur mag worden verwacht. Hoe veel hoger die temperatuur gemiddeld zal zijn is niet bekend.

Ook voor de drinkwaterwereld is de temperatuur in de ondiepe ondergrond van belang, omdat die van invloed is op de temperatuur van het water in de drinkwaterleidingen. In verband hiermee is in 2008 een rapport verschenen over onderzoek naar de warmteindringing in de bodem als functie van oppervlaktebedekking (Van der Molen en Kooi, 2008). Doel van het onderzoek was om te bepalen welke factoren een snelle opwarming bevorderen van de bodem tot op de diepte van het drinkwaterleidingnet. In het onderzoek zijn bodemtemperaturen op verschillende dieptes gemeten onder drie verschillende oppervlaktetypes (bestrating, gras en plantsoen) op pompstation Dorst (buitengebied). Er is gemeten tussen de 0 en 1,5 m-mv. De resultaten zijn in figuur 1.23 te zien.



**figuur 1.23** Gemiddelde temperatuurprofielen tijdens de gehele meetperiode van 26 juni t/m 29 september 2008 (getrokken lijnen) en tijdens de warme periode van 23 juli t/m 3 augustus 2008 (onderbroken lijnen) (Van der Molen en Kooi, 2008)

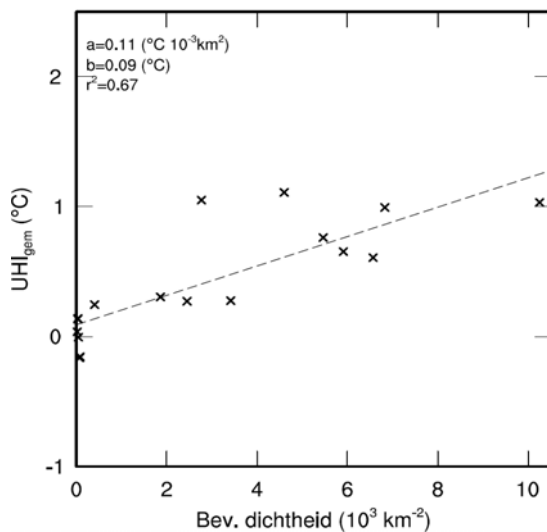
Uit bovenstaande figuur is af te leiden dat de bodemtemperatuur onder bestrating hoger is dan onder gras en plantsoen. Dit is verklaarbaar aan de hand van het lagere albedo (mate van reflectie van zonlicht) en de veel lagere koeling door verdamping (Van der Molen en Kooi, 2008). Gemiddeld is de bodem op 1 m-mv onder gras circa 1,1 °C koeler dan onder bestrating, en onder plantsoen 2,8 °C graden koeler. Tijdens warme periodes loopt dit verschil op tot respectievelijk 1,8 en 3,7 °C.

Door middel van gevoeligheidssimulaties is in ditzelfde onderzoek gekeken naar de gevoeligheid van de bodemtemperatuur voor verschillende parameters. Hieruit kunnen een aantal conclusies worden getrokken:

- Het albedo blijkt een geringe invloed te hebben op de bodemtemperaturen; de lagere temperatuur onder gras vergeleken met de temperatuur onder bestrating moet daarom verklaard worden door het verschil in verdamping.
- De thermische eigenschappen van de bodem verschillen per bodemsoort en met vochtgehalte. Droge kleibodems warmen minder snel op gedurende een warme periode dan zandbodems op 1 m-mv. Voor zandbodems heeft de aanwezigheid van water weinig invloed op de bodemtemperatuur. Natte kleibodems worden daarentegen sneller warm dan droge kleibodems.
- De weersomstandigheden hebben een grote invloed op de bodemtemperaturen. In het model wordt aangetoond dat de bodemtemperatuur tijdens een hittegolf in ongeveer drie weken tijd met 5 °C kan toenemen tot een diepte van 1,5 m-mv.

Uit het onderzoek is geconcludeerd dat de grootste kans op hoge bodemtemperaturen optreedt onder bestrate oppervlaktes op zandbodems. Aanzienlijke verlaging van de bodemtemperaturen kan bereikt worden door het oppervlak te laten begroeien (meer verdamping) en aanplant te doen die ervoor zorgt dat het oppervlak tenminste een deel van de dag in de schaduw blijft (Van der Molen en Kooi, 2008).

Het KNMI voert sinds 2009 met behulp van weeramateurdatabronnen onderzoek uit naar het stadseffect Nederland ([www.KNMI.nl](http://www.KNMI.nl)). Van meer dan 200 weeramateurs zijn meetgegevens verzameld. Hieruit is een selectie gemaakt op basis van stationskenmerken en meetlocatie. Het UHI-effect is bepaald door te kijken naar het temperatuurverschil tussen het weeramateurstation en het dichtstbijzijnde KNMI-weerstation buiten de stad (<15 km). Door deze selectie zijn 19 stations (figuur 1.25) overgebleven waarvoor de lokale bevolkingsdichtheid is bepaald met behulp van gegevens van het CBS ([www.CBS.nl](http://www.CBS.nl)). Het UHI-effect dat uit de metingen is afgeleid is in figuur 1.25 uitgezet tegen de bevolkingsdichtheid.



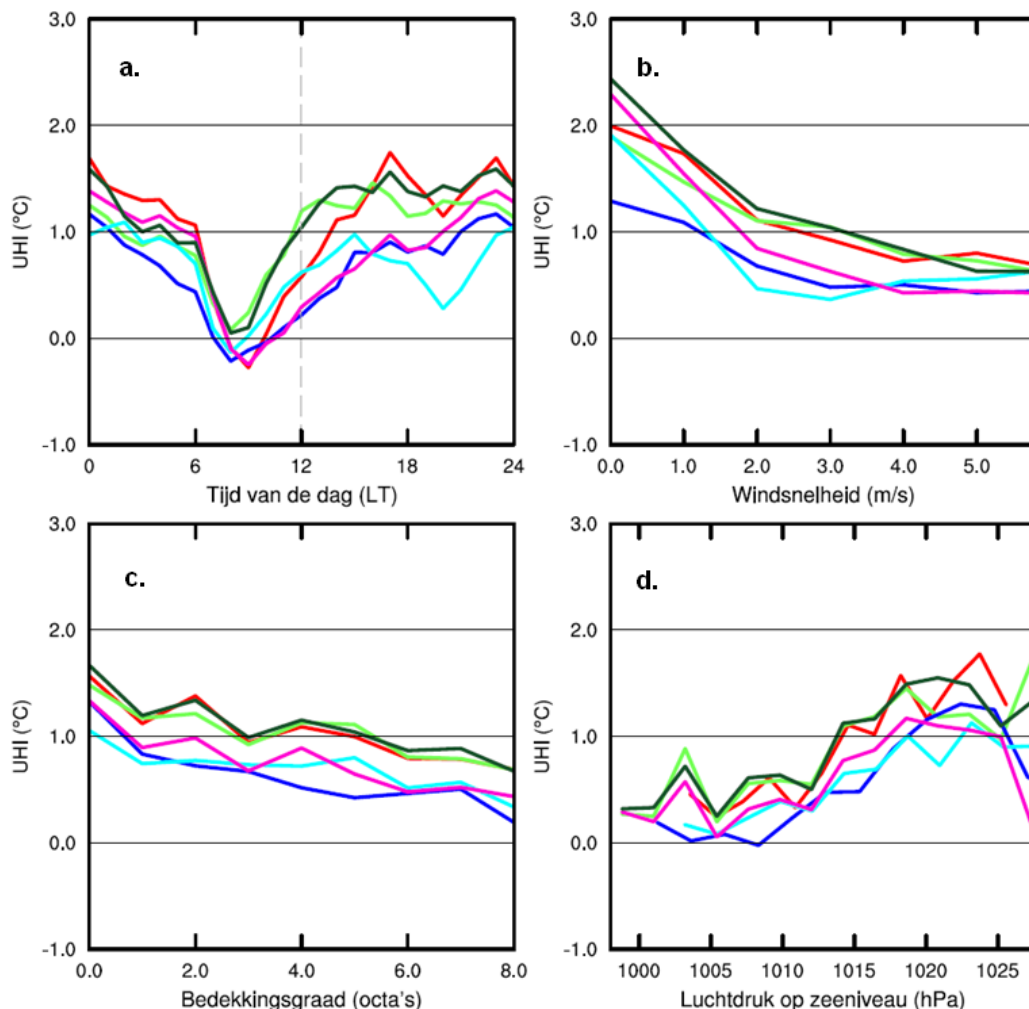
**figuur 1.25** Scatterplot van het gemiddelde UHI-effect gedurende de zomer van 2010 in relatie tot de lokale bevolkingsdichtheid (stippel-lijn: lineaire trend). Bron: [www.KNMI.nl](http://www.KNMI.nl)



**figuur 1.25** Satellietbeeld van Nederland, met locaties van de weeramateurstations die voldoen aan de gestelde selectiecriteria. Bron: Google Earth

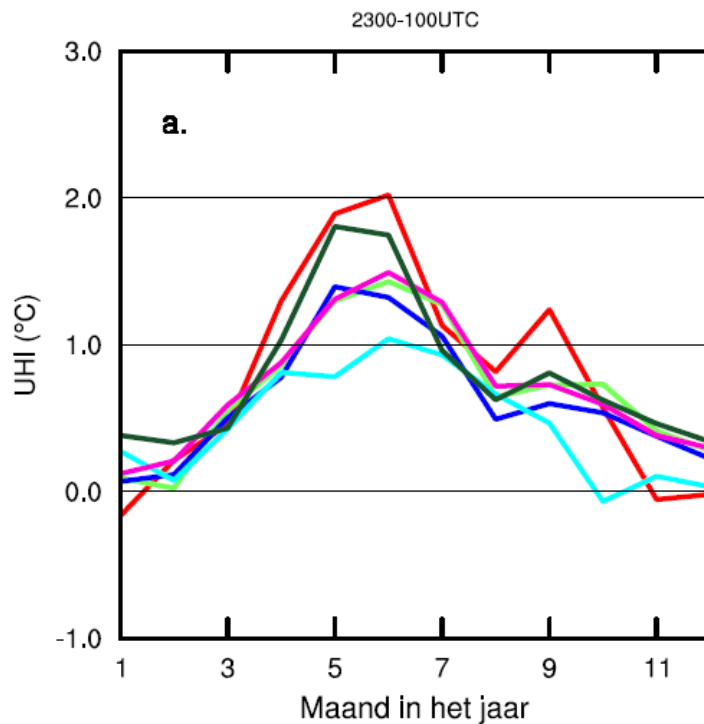
In figuur 1.25 is langs de verticale as het zomergemiddelde UHI uitgezet, bepaald als het temperatuurverschil tussen het weeramateurstation en het dichtstbijzijnde KNMI-station. De horizontale as geeft de bevolkingsdichtheid aan. Hieruit blijkt dat het UHI toeneemt met toenemende bevolkingsdichtheid. Stations in woonwijken in de stad tonen een UHI tussen circa 0,5 en 1,0 °C terwijl stations met een lage bevolkingsdichtheid een UHI tonen dichtbij 0 °C. De spreiding is alsnog vrij groot; dit is vanwege het feit dat meetomstandigheden op de locaties verschillen en doordat het UHI-effect niet alleen van bevolkingsdichtheid afhangt.

Uit de eerdergenoemde onderzoeken is al gebleken dat het UHI-effect sterk afhankelijk is van het weertype. In Nederland was hiernaar echter nog geen onderzoek gedaan. Figuur 1.26 toont de correlatie tussen het UHI-effect op 6 weeramateurstations in stedelijk gebied verspreid over het land, en de tijd van de dag, de windsnelheid, de wolkenbedekkingsgraad en de luchtdruk.



**figuur 1.26** Gemiddeld verloop van het UHI in de zomer van 2010 als functie van de tijd van de dag (a.) en de gemeten windsnelheid (b.), wolkenbedekkingsgraad (c.) en luchtdruk (d.) voor de 6 geselecteerde weeramateurstations in 'stedelijk' gebied. Bron: [www.KNMI.nl](http://www.KNMI.nl)

Uit figuur 1.26 is op te maken dat het UHI-effect het sterkst is bij mooi, helder zomerweer gedurende de nacht. Verder heeft het KNMI het verloop van het (nachtelijk) UHI-effect als functie van de tijd van het jaar in kaart gebracht (figuur 1.27). Hieruit blijkt dat het UHI-effect 's zomers (tussen 0,5 en 2,0 °C) veel groter is dan in de winter (tussen 0 °C en 0,5 °C).



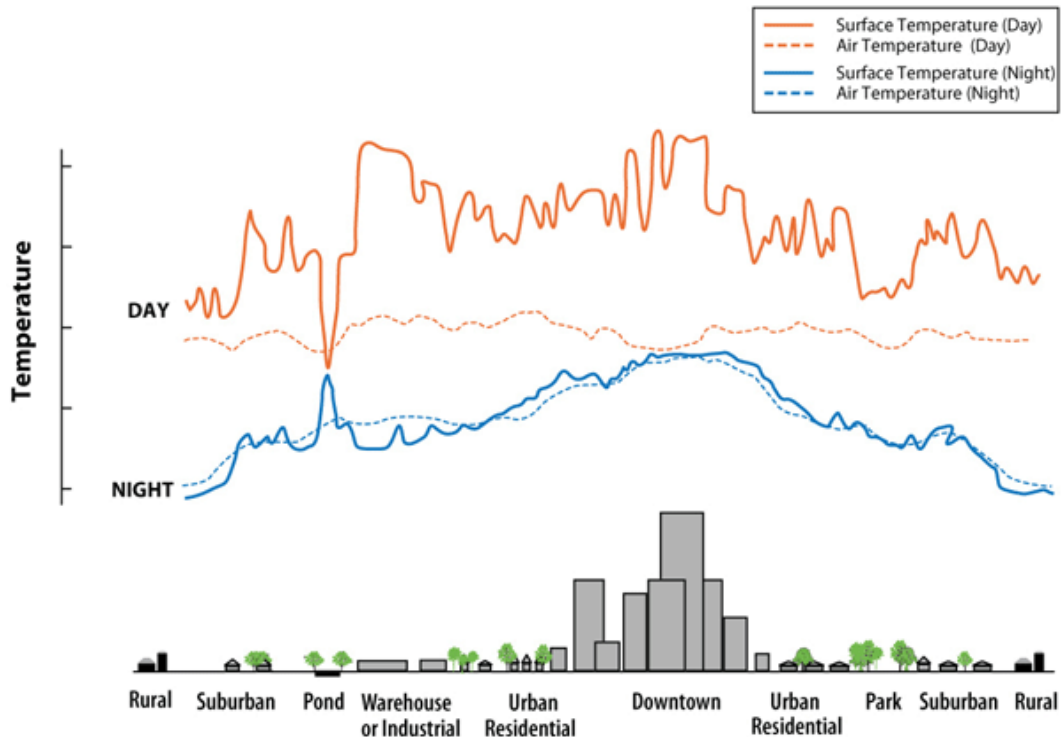
figuur 1.27  
Verloop van het maand-gemiddelde nachtelijk UHI over de verschillende maanden van het jaar 2010, voor de 6 weeramateurstations in 'stedelijk' gebied. Bron: [www.KNMI.nl](http://www.KNMI.nl)

Uit de metingen van de weeramateurstations van het KNMI in de zomer van 2010 blijkt dat het in steden warmer is dan op het platteland. Het UHI-effect neemt toe bij een toenemende bevolkingsdichtheid, is het sterkst gedurende zomerse, heldere en windstille nachten.

Vanwege de eenduidige resultaten van de verschillende stations kunnen deze gegevens als representatief worden beschouwd. Vanwege het kleine aantal meetstations en de korte meetperiode (1 jaar) is meer onderzoek nodig om tot representatieve langjarige gemiddelden te komen. Ook is bij dit onderzoek alleen in woonwijken gemeten; in stadscentra wordt een hoger UHI-effect verwacht dan uit dit onderzoek gebleken, door de relatief hoge bebouwingdichtheid en vanwege de grotere afstand tot de rand van de stad.

Recent onderzoek van Floor (Zenit; artikel in voorbereiding) beschrijft dat in een stad met één miljoen inwoners het gemiddelde jaarlijkse UHI effect 1 tot 3 °C bedraagt. Tijdens kalme, heldere stralingsnachten kan het temperatuurverschil oplopen tot 10-12 °C. In kleinere steden zijn de effecten minder groot. Het warmte-eilandeffect is in de oppervlaktetemperaturen vrijwel altijd zichtbaar (figuur 1.28). De verschillen tussen stedelijk en niet-stedelijk gebied zijn overdag het grootst; de verschillen bedragen dan 10 tot 15 °C.

's Nachts liggen de temperaturen 5 tot 10 °C uiteen. Waar deze verschillen in oppervlaktetemperatuur precies optreden is niet aangegeven (als deze getallen bijvoorbeeld gelden voor een dakoppervlak, dan is dat voor de bodemtemperatuur niet relevant). Ook de tijd van het jaar is van invloed doordat de instraling van de zon, de begroeiing en het weer veranderen met het seizoen.



**figuur 1.28** De luchttemperatuur op leefhoogte en de oppervlaktetemperatuur variëren beide met landgebruik. De oppervlaktetemperatuur (getrokken rode lijn) varieert overdag sterker dan de luchttemperatuur (gestippelde lijn); 's nachts (getrokken en gestippelde blauwe lijn) liggen de temperaturen dicht bij elkaar. Water heeft een zeer grote warmtecapaciteit en de temperatuur van vaarten, vijvers, etc., verandert in de loop van een etmaal nauwelijks. Bron: US Environmental Protection Agency.

Het UHI-effect is minder uitgesproken in de luchttemperaturen op leefniveau. Overdag is het verschil vaak minimaal; 's nachts treedt het verschijnsel duidelijker op, vooral kort voor zonsopkomst. Typische waarden voor het temperatuurverschil in stedelijk en niet-stedelijk gebied bedragen dan 7 tot 12 °C. Het effect hangt af van de weersomstandigheden en het seizoen en is het meest uitgesproken in de winter.

De temperaturen van het oppervlak en van de lucht op leefniveau staan overigens niet los van elkaar. Zo is de oppervlaktetemperatuur in parken en andere begroeide gebieden lager, wat ook leidt tot een lagere luchttemperatuur. Bestratingen en daken van gebouwen kunnen 25 tot 50 °C warmer zijn dan de lucht erboven, wat doorwerkt in de gemeten, relatief hoge luchttemperaturen.

In deze publicatie zijn echter geen referenties opgenomen en is niet uitgelegd hoe dit onderzoek heeft plaatsgevonden. Wel wordt duidelijk wat in Amerika de temperatuurver-



schillen tussen oppervlakte- en luchttemperatuur zijn, of dit in Nederland in dezelfde mate van toepassing is, is onbekend. Bron: <http://www.keesfloor.nl/artikelen/zenit/stadsklimaat>).

## 1.6 Opwarming door klimaatverandering: effect op de bodemtemperatuur

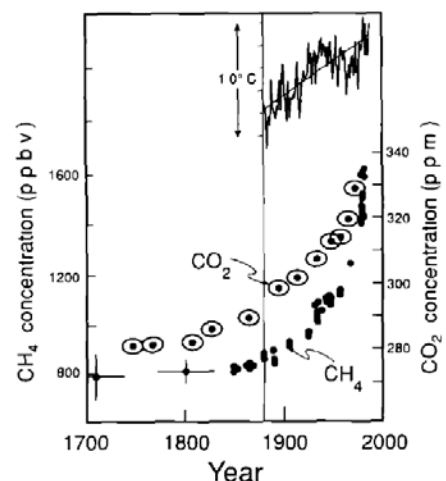
De hogere temperatuur aan de oppervlakte in stedelijk gebied heeft ook gevolgen voor de temperatuur in de ondergrond. Opwarming van meer dan 1 °C aan de oppervlakte kan leiden tot een invers bodemtemperatuurprofiel (Stolk, 2000), waarbij de bodemtemperatuur in het gedeelte van de bodem waar de seizoensfluctuaties geen invloed meer hebben (>20 m-mv) eerst afneemt (als gevolg van opwarming aan de oppervlakte) waarna de temperatuur weer toeneemt en op grotere diepte weer de natuurlijke temperatuurgradiënt volgt. De diepte van de minimumtemperatuur is een maat voor hoe lang geleden de opwarming is opgetreden/begonnen. Een studie van Ferguson & Woodbury (2004) bevestigt dit met temperatuurmetingen in de ondergrond van steden. Uit de studie blijkt dat de stijging van de bodemtemperatuur bij oudere stadsdelen dieper is doorgedrongen dan bij recentere stadsdelen.

In Nederland heeft Kooi (2008) onderzoek gedaan naar veranderingen in de bodemtemperatuur ten opzichte van de metingen die in de jaren '70 zijn gedaan in de provincie Utrecht (naar temperatuurverschillen als gevolg van verschillen in landgebruik). Het onderzoek is niet specifiek gericht op het UHI-effect maar geeft wel duidelijk weer welke veranderingen in bodemtemperatuur optreden in de loop van de tijd, met name door klimaatverandering, maar ook door veranderingen in landgebruik.

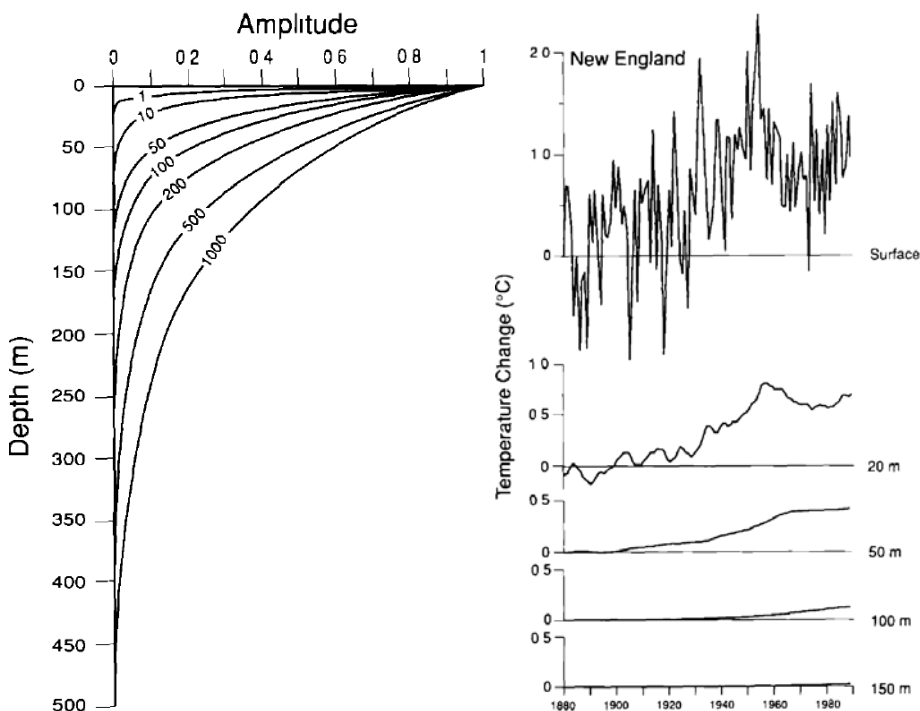
Zoals beschreven in paragraaf 2.2.1 is de gemiddelde wereldwijde luchttemperatuur met circa 0,8 °C gestegen sinds 1950. In Nederland verloopt de opwarming sinds 1975 erg snel. Volgens het IPCC is het zeer waarschijnlijk dat deze temperatuurstijging een gevolg is van de klimaatverandering door menselijke activiteiten, zoals het verbranden van fossiele brandstoffen, ontbossing en industriële en agrarische activiteiten (waardoor de concentratie aan broeikasgassen in de atmosfeer stijgt).

Modelberekeningen geven aan dat de temperatuur met 1,1 tot 6,4 °C stijgt tussen 1990 en 2100. Met name temperatuurstijgingen van meer dan 2 °C zouden grote veranderingen met zich meebrengen voor de maatschappij, maar ook het milieu, onder andere door zeespiegelstijging, toename van droogte- en hitteperioden en extreme neerslag. In figuur 1.29 is het verloop van de oppervlaktetemperatuur en het gehalte aan broeikasgassen in de atmosfeer weergegeven. Hier is te zien dat de toename van de concentratie broeikasgassen samengaat met de temperatuurstijging.

**figuur 1.29**  
Verloop van de oppervlaktetemperatuur en atmosferische concentratie van CO<sub>2</sub> en methaan (Pollack, 1993)



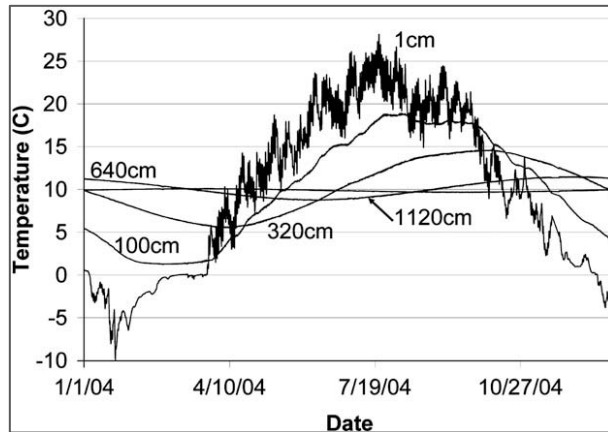
Figuur 1.30 geeft de diepte en periode aan waarin een temperatuurstap aan het oppervlak doordringt in de bodemtemperatuur. In de linker grafiek is te zien dat de dagelijkse fluctuatie tot een diepte van 1 meter beneden maaiveld doordringt, de seizoenale fluctuatie tot circa 15 m-mv, een honderdjarige cyclus is tot 150 m-mv zichtbaar en een duizendjarige fluctuatie is tot een diepte van 500 m-mv te zien. Dit betekent dat bij toenemende diepte steeds verder wordt teruggekeken in de tijd. De bodemtemperaturen kunnen daarom ook worden gebruikt om historische veranderingen in de oppervlakte temperatuur te achterhalen, waardoor deze gegevens bruikbaar zijn voor onderzoek naar klimaatveranderingen (zie o.a. Pollack, 1993).



figuur 1.30

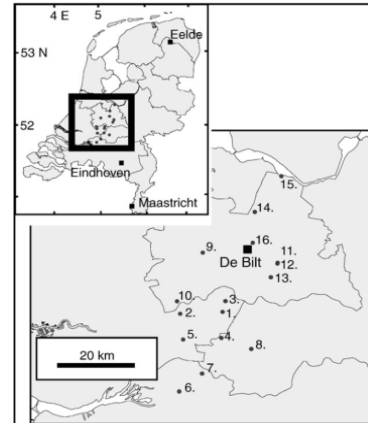
Links: Damping van amplitude van een thermische golf tegen de diepte geplot in een medium met thermische diffusiviteit van  $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Getallen in de curves geven de periode van de thermische golf aan in jaren. Rechts: Gemeten oppervlaktetemperatuur voor noordoosten van de USA sinds 1880. De toename in oppervlaktetemperatuur over periode van 110 jaar is vanaf 1970 op 150 m diepte te zien. (Bron: Pollack, 1993)

In figuur 1.31 is de demping van de amplitude van de seizoenale fluctuatie duidelijk zichtbaar. Hier is de bodemtemperatuur over de periode van één jaar gemeten tot een diepte van 11,2 m-mv, waar de seizoensinvloed op de bodemtemperatuur nog nauwelijks zichtbaar is. Ook blijkt hieruit dat er met toenemende diepte een steeds grotere vertraging optreedt in het moment waarop de minimale en maximale temperatuur optreedt. De temperatuurgolf wordt in de diepte dus zowel gedempt als verschoven in de tijd.



**figuur 1.31**  
**Voorbeeld van bodemtemperatuurmetingen (uurmetingen) in St. Paul, (Minnesota, VS) onder gras over een periode van één jaar (data afkomstig van Dr. Dave Ruschy) (Taylor en Stefan, 2009)**

Kooi (2008) heeft onderzoek gedaan naar de ruimtelijke verdeling van de opwarming van de bodem sinds de jaren '70. Hierin wordt gesteld dat de bodemtemperaturen wereldwijd stijgen door een stijgende oppervlakte temperatuur, maar ook door andere natuurlijke en antropogene veranderingen aan de aardoppervlakte. Beter inzicht in de effecten van laatstgenoemde factoren is van belang voor geothermische toepassingen en klimatologisch onderzoek, maar ook voor het genereren van uitgebreide kennis over de ondergrond en de ruimtelijke variabiliteit ervan.



**figuur 1.32** **Locaties meetputten onderzoek Kooi (2008)**

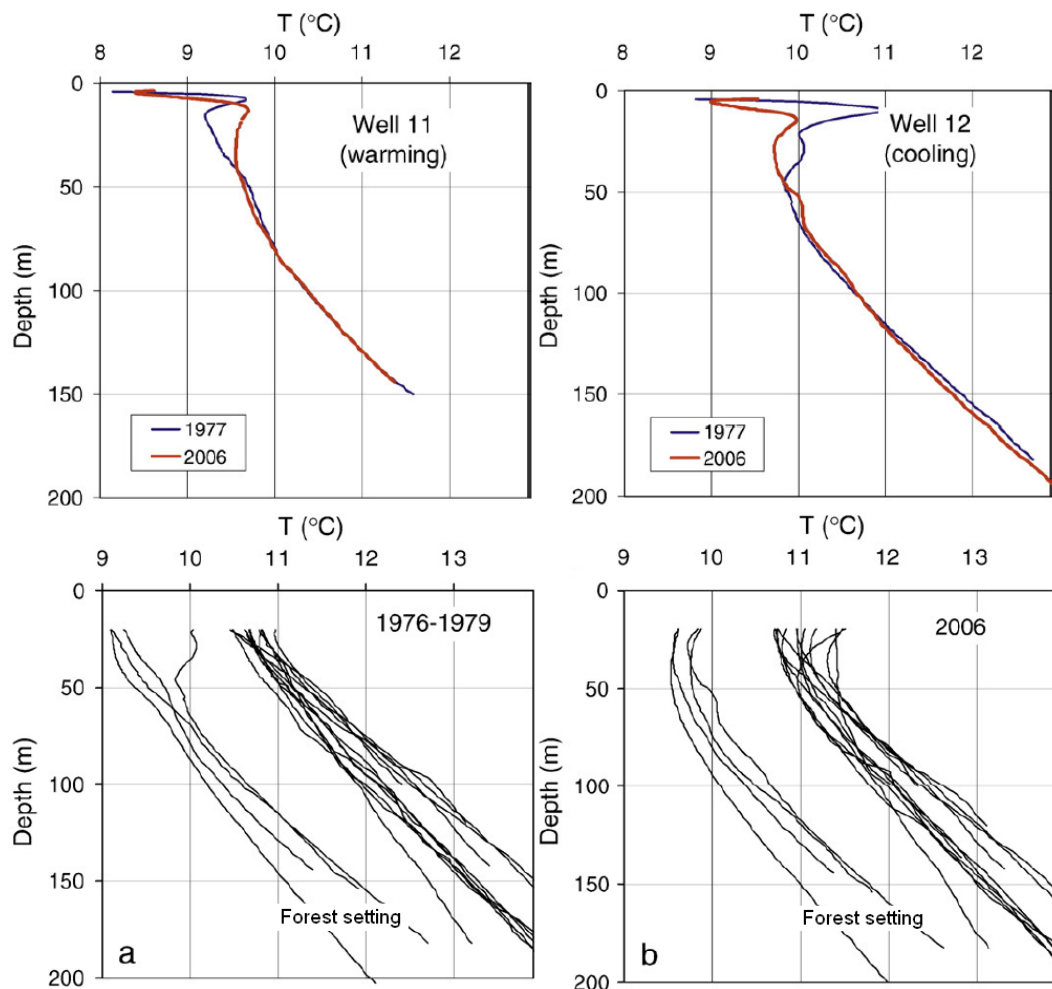
Kooi heeft 16 meetputten in de omgeving van De Bilt onderzocht (figuur 1.32), waarvan metingen beschikbaar zijn uit de jaren '70. In deze meetputten zijn in het kader van het onderzoek nieuwe bodemtemperatuurprofielen gemeten. Uit de metingen blijkt dat de bodemtemperatuur sinds de jaren '70 duidelijk is veranderd (tabel 1.1).

**tabel 1.1** **Bodemtemperatuurgegevens en geschatte grondwatertemperatuur (verandering) (Kooi, 2008)**

Well nr	Well code	Old log	New log	Current land use	GST old (°C)	GST new (°C)	ΔGST (°C)
1	B38F0503	1979	27-4-2006	Agr.	10.6	11.3	0.7
2	B38E0121	1979	28-4-2006	Agr./urb.	10.7	11.2	0.5
3	B38F0504	1979	8-5-2006	Agr.	10.3	10.8	0.5
4	B38H0178	1979	9-5-2006	Agr.	10.6	11.0	0.4
5	B38G0304	1979	9-5-2006	Urb. <sup>b</sup>	10.8	11.9	1.1
6	B44E0118	1978	10-5-2006	Agr.	10.3	11.0	0.7
7	B44E0119	1978	11-5-2006	Agr.	10.5	11.0	0.5
8	B39C0104	1977	15-5-2006	Agr.	10.5	11.4	0.9
9	B31G0147	1977	16-5-2006	Urb. <sup>b</sup>	10.9	12.8	1.9
10	B38E0098	1976	16-5-2006	Agr.	10.7	11.4	0.7
11	B32C0233	1977	17-5-2006	Forest <sup>a</sup>	9.0	9.8	0.8
12	B32C0230	1977	17-5-2006	Forest/urb. <sup>a,b</sup>	10.3	9.8	-0.5
13	B39A0210	1976	17-5-2006	Agr.	9.8	10.6	0.8
14	B32A0335	1977	18-5-2006	Forest	9.0	9.8	0.8
15	B26D0005	1978	18-5-2006	Agr.	10.4	10.7	0.3
16	B32C0336	1977	19-5-2006	Forest	8.9	10.3	1.4

<sup>a</sup> Dicht bij grondwateronttrekking

<sup>b</sup> Verandering in landgebruik binnen een straal van 100 meter



figuur 1.33

Boven: Bodemtemperatuurprofielen voor meetput 11 en 12 (op 270 m afstand van elkaar), waar rechts de afkoeling van meetput 12 naar voren komt; dit wordt geïnterpreteerd aan de hand van veranderingen in landgebruik. De temperatuurdaling reflecteert het effect van het aangroeien van het bladerdak van een bos nadat deze in het verleden (1972-1973) gekapt is. Voor meetput 11 (links) geldt geen verandering in landgebruik sinds de jaren '70).

Onder: Bodemtemperatuurmetingen van De Bilt en omgeving a. Oude metingen uit de periode 1976-1979 geven op 25 m-mv temperaturen van 9.1-10.1 °C in bosgebied en 10.5-10.9 °C voor de overige locaties. b. Nieuwe metingen van april 2006 die op 25 m-mv temperaturen geven van 9.6-9.8 °C in bosgebied en 10.7-11.5 °C voor de overige locaties (Kooi, 2008)

Door middel van modellering aan de hand van oppervlaktetemperaturen, concludeert Kooi dat een aanzienlijk deel van de variabiliteit binnen gebieden met vergelijkbaar bodemgebruik kan worden verklaard door ruimtelijke verschillen in thermische eigenschappen van de bodem en variaties in de grondwaterstroming. Voor sommige meetputten is deze verklaring echter niet toereikend, wat de bijdrage van andere invloeden (onafhankelijk van de oppervlaktetemperatuur) impliceert als oorzaak van de bodemtemperatuurverschillen. Bij meetput 12 (figuur 1.33, rechtsboven) is aan afwijkende daling van de bodemtemperatuur gemeten, die gekoppeld kan worden aan de teruggroei van een bos nadat deze in het verleden (1972-1973) is gekapt. Gevolg van het teruggroeien van het bos was een daling van de bodemtemperatuur. Meetput 11 bevindt zich 270 meter ten zuidoosten van meetput 12. In meetput 11 is in 2006 een duidelijke hogere temperatuur gemeten ten opzichte van de metingen in de jaren '70. Op deze locatie heeft, in tegenstelling tot meetput 12, geen verandering in landgebruik plaatsgevonden en is meer dan 30 jaar sprake geweest van bosrijk gebied. De metingen van 1977 in meetput 12 vertonen in de bovenste 40 à 50 m duidelijk een abnormaal hoge bodemtemperatuur, waarschijnlijk veroorzaakt door de 5 jaar eerder uitgevoerde boskap. De daling van de bodemtemperatuur als gevolg van de teruggroei van het bos is hier groter dan de (tegelijk voorkomende) stijging van de bodemtemperatuur ten gevolge van opwarming door klimaatverandering.

De resultaten van het onderzoek van Kooi (2008) tonen aan dat (herhaalde) bodemtemperatuurmetingen kunnen helpen om belangrijke anomalieën in de individuele meetputdata te verklaren.

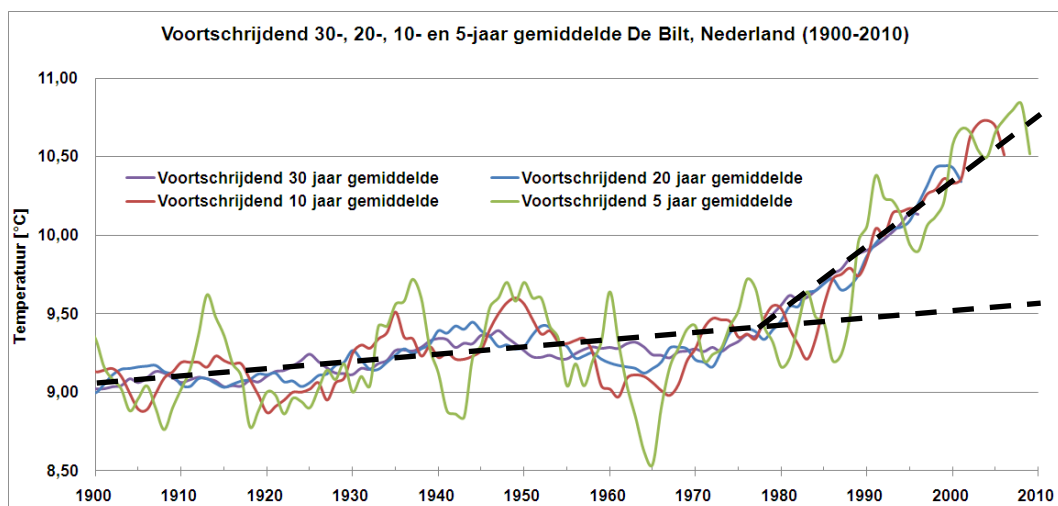
## 2 Uitgangspunten autonome opwarming

Ananda Floris en Benno Drijver

In Nederland treden veranderingen in de bodemtemperatuur vooral op door wijzigingen aan de oppervlakte, zoals veranderingen in de temperatuur aan de oppervlakte (klimaatverandering, verandering in landgebruik, verstedelijking) en de waterhuishouding, maar ook op grotere diepte door de invloed van WKO-systemen. Om een indruk te krijgen van de verhouding tussen de effecten van WKO-systemen en de veranderingen in de bodemtemperatuur die ook zonder WKO optreden zijn berekeningen uitgevoerd aan de autonome opwarming (zie hoofdstuk 4). Voor deze berekeningen zijn gegevens nodig over de omvang van de opwarming aan de oppervlakte. In dit hoofdstuk zijn de uitgangspunten voor de berekeningen bepaald, in paragraaf 3.1 voor de klimaatverandering en in paragraaf 3.2 - 3.5 voor de verstedelijking (stedelijk warmte-eiland).

### 2.1 Opwarming door klimaatverandering

Een indruk van de effecten van klimaatverandering op de bodemtemperatuur kan worden verkregen door gebruik te maken van analytische berekeningen. Uitgangspunt in deze analytische berekeningen is een lineaire stijging van de temperatuur aan de oppervlakte. In figuur 2.1 zijn voortschrijdende gemiddelden geplot van de oppervlaktetemperatuur in De Bilt vanaf 1900, voor periodes variërend van 5 tot 30 jaar.



figuur 2.1 Voortschrijdende 30-, 20-, 10- en 5-jaar gemiddelden van de oppervlaktetemperatuur 1900-2010 (bron: [www.KNMI.nl](http://www.KNMI.nl)). De voortschrijdende gemiddelden zijn gebaseerd op (in het geval van 30-jaar gemiddelde) de 15 jaar vóór en de 15 jaar na het jaar waarvoor de gemiddelde temperatuur wordt bepaald. De stippellijnen geven de twee verschillende temperatuurstijgingen gebruikt in de berekeningen schematisch weer

De opwarming verloopt in eerste instantie relatief langzaam en versnelt vervolgens sterk in de laatste 30 à 40 jaar. Voor de berekening kan dit worden geschematiseerd als twee lineaire stijgingen: één van 1900-2010 (stijging met 0,5 °C) en één van 1976-2010 (stijging met 1,2 °C bovenop deze 0,5 °C), waarmee de totale stijging in de periode 1900-2010 uitkomt op 1,7 °C (stippellijnen in figuur 2.1). De totale opwarming door klimaatverandering vanaf 1976 is dan 1,3 à 1,4 °C, wat overeen komt met ongeveer 0,39 °C per 10 jaar.

De prognose in 2006 was dat de gemiddelde temperatuur in 2050 (gemeten als gemiddelde over 2036-2065) 0,9 à 2,55 °C hoger zou zijn dan in 1990. Dit komt overeen met een gemiddelde temperatuurstijging van 0,15 à 0,44 °C per 10 jaar. Aangezien de trendlijn over de periode 1976-2010 (0,39 °C per 10 jaar) binnen deze bandbreedte valt, is deze trend in dit onderzoek doorgetrokken naar 2040. De totale temperatuurstijging door klimaatverandering in 2040 ten opzichte van 1900 komt dan uit op 2,9 °C.

## 2.2 Opwarming door verstedelijking

De bestaande kennis over de grootte van het stedelijk warmte-eiland effect is beschreven in paragraaf 2.3. In de beschikbare gegevens is echter sprake van verschillende definities van het UHI-effect. Bovendien is op verschillende momenten en in verschillende perioden gemeten en betreft het overgrote deel van de metingen luchttemperaturen in plaats van oppervlaktetemperaturen. In tabel 2.1 staat een overzicht van de gegevens uit paragraaf 2.3.

**tabel 2.1** Overzicht van de voor Nederland relevante informatie over het UHI-effect

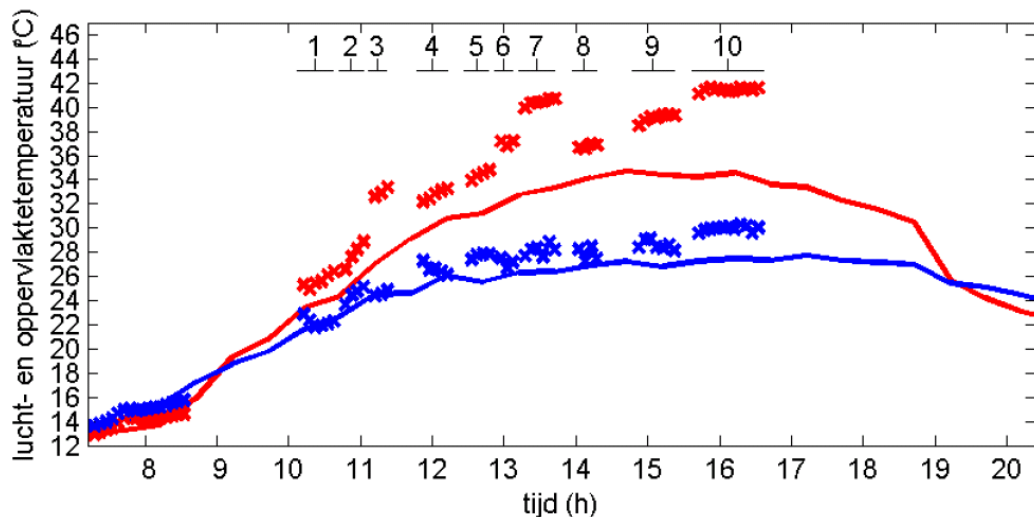
Bron	Periode temperatuurverandering/ metingen	Grootte UHI-effect [°C]	Bepaling op basis van
<b>Luchttemperaturen</b>			
Conrads (1975), Utrecht	1969-1971	1,7-2,7 °C	Gemiddeld verschil in de dagelijkse minimum temperatuur tussen de stad Utrecht en het platteland: in de winter 1,7 °C en in de zomer 2,7 °C
Oké (1973)	1973	6,5 °C (Utrecht)	Maximaal UHI-effect, inschatting op basis van inwoneraantal
Voogt, jaar onbekend	1997-1999	-0,4 tot +1,8 Inschatting gemiddelde = 0,7	Temperatuurverschil tussen stedelijk en omliggend landelijk gebied, gemiddelde 1997-1999 per dag en per tijdstip
Provincie Utrecht, 2008	2006	1,1 °C	Gemiddelde UHI voor de stad Utrecht
Provincie Utrecht, 2008	2006	> 5 °C	Maximale UHI voor de stad Utrecht
Brandsma, 2009	mrt. 2006-jan 2009	0,6-1,5 °C	Mobiele metingen op de fiets een 14 km langs dwarsprofiel Nieuwegein-Utrecht-De Bilt. Gemiddeld temperatuurverschil tussen centrum Utrecht en KNMI, De Bilt voor ochtendprofielen 1,5 °C (106 metingen voor zonsopkomst) en voor de namiddag 0,6 °C (77 metingen)

Bron	Periode temperatuurverandering/metingen	Grootte UHI-effect [°C]	Bepaling op basis van
<b>Luchttemperaturen</b>			
Brandsma, 2009	mrt 2006-jan 2009	5,4 °C	Maximaal temperatuurverschil tussen centrum Utrecht en KNMI, De Bilt
Buttstädt et al, 2010	mrt-juni 2010	2,5 °C	Temperatuurprofielen gemeten met stad-bussen in Aken (Duitsland) voor de middag. In de gemiddelde waarden over de 15 dagen waarop is gemeten is het maximale verschil 2,5 °C met het minimum in bosgebied
KNMI, 2011	zomer 2010	0,5-1,0 °C	Gemiddeld verschil tussen meetstations in stadswijken en nabijgelegen KNMI station in buitengebied (zomer 2010)
	heel 2010	2 °C	Maandgemiddelde van het maximale verschil in de nacht tussen meetstations in stadswijken en nabijgelegen KNMI stations in buitengebied (grootste verschil in treedt op in juni)
<b>Beelden gemaakt vanuit vliegtuigen/satellieten</b>			
Aken, infraroodbeelden	20.00-21.20 23 sept 1998	10-12 °C	Vershil in oppervlaktetemperaturen, momentopname(n) vlak na zonsondergang
Schwartz en Seppelt, 2009	juli 2002	overgrote deel 0,5 - 1,5	Gemiddelde UHI voor 200 Europese steden op basis van satellietbeelden van 22.30 uur voor 8 dagen in juli 2002. UHI = standaard deviatie van oppervlaktetemperatuur binnen de gemeentegrenzen van de betreffende stad
Alterra, 2009	6 augustus 2009 21.30-23.00 uur	inschatting > 10 °C	Infraroodbeelden van Arnhem en Nijmegen na een aantal warme dagen
<b>Bodemtemperatuur</b>			
Van der Molen en Kooi (2008)	26-06 t/m 3-08 2008	Gras: +1.7 °C Bestrating: + 2.8 °C	Gemiddeld temperatuurverschil op 1 m-mv t.o.v. plantsoen over de meetperiode.

Door verstedelijking kan het maximale verschil in de luchttemperatuur in Nederlandse steden zoals Utrecht oplopen tot 5 à 6 °C. Het gemiddelde UHI-effect in de luchttemperatuur voor steden ter grootte van Utrecht bedraagt 1 á 2 °C. Dit is echter per stad afhankelijk van de grootte, hoogte van de gebouwen, de aanwezigheid van parken en plantsoenen, veelgebruikt bouw- en wegmateriaal en het klimaat.



De beelden vanuit de lucht geven echter aan dat de verschillen in de oppervlaktetemperatuur veel groter zijn dan de verschillen in de luchttemperatuur. Het onderzoek van Van der Molen en Kooi (2008) bevestigt dit door gelijktijdige metingen van de luchttemperatuur en de oppervlaktetemperatuur uit te voeren (zie figuur 2.2 en tabel 2.2). Het verschil in luchttemperatuur bedraagt volgens figuur 2.2 maximaal 8 °C en het verschil in oppervlaktetemperatuur ongeveer 12 °C. De verklaring voor dit verschil is dat de oppervlakte eerst wordt opgewarmd en deze vervolgens de lucht erboven opwarmt. Doordat tegelijkertijd luchtstroming optreedt, zal de luchttemperatuur niet het niveau van de oppervlaktetemperatuur bereiken. In de stad is de luchtstroming bij het aardoppervlak meestal minder dan daarbuiten, wat ervoor zorgt dat de oppervlaktetemperatuur in de stad verder kan oplopen dan daarbuiten. Ook is in de stad een veel groter deel van het oppervlak verhard, waar andere oppervlaktetemperaturen bij horen. Hoewel de metingen slechts van 1 dag zijn, kan hieruit wel worden afgeleid dat het UHI-effect in de oppervlaktetemperatuur waarschijnlijk groter is dan in de luchttemperatuur.



**figuur 2.2** Oppervlakte- (rood) en luchttemperaturen (blauw) gemeten op 24 juli 2008 op diverse locaties in de stad Breda (x) vergeleken met temperaturen gemeten met een referentiestation boven bestrating op pompstation Dorst (getrokken lijn). De locaties staan boven aan de figuur aangegeven met nummers, die terug te vinden zijn in

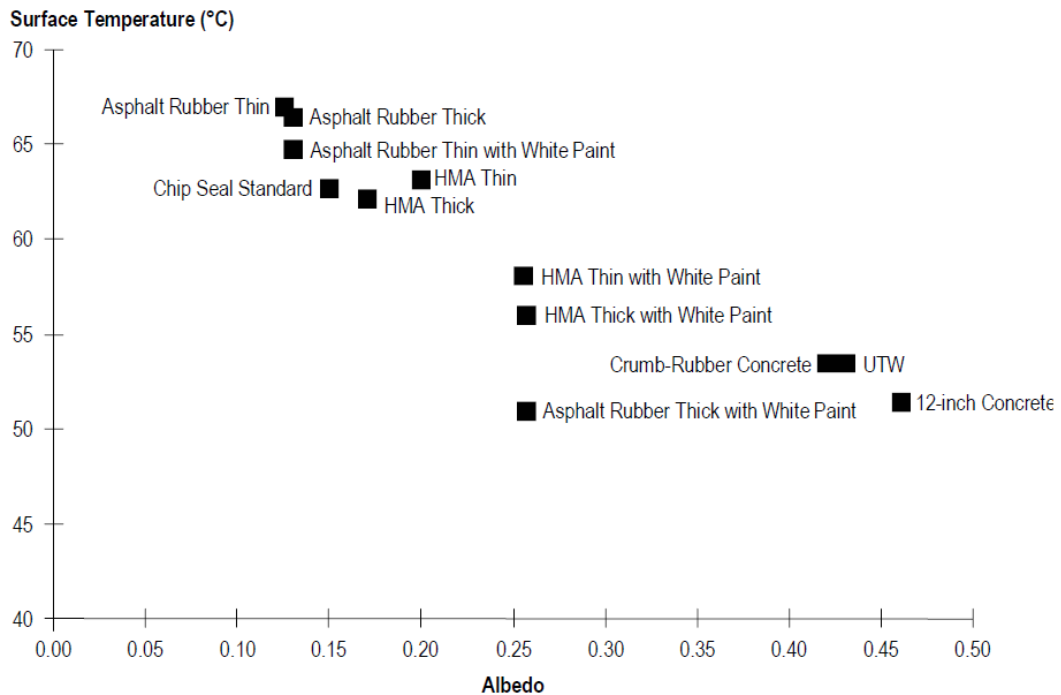
**tabel 2.2 (Bron: van der Molen en Kooi, 2008).**

**tabel 2.2**      **Vershil in oppervlakte- en luchttemperaturen en stralingscomponenten gemeten op 24 juli 2008 op verschillende locaties in de stad Breda ten opzichte van een referentiestation boven bestrating op pompstation Dorst (Bron: v.d. Molen en Kooi, 2008)**

lokatie nr.	tijd van tot hh:mm hh:mm		temperatuur		straling				netto straling W m <sup>2</sup>
			oppervlakte °C	lucht °C	kortgolvig inkomend W m <sup>2</sup>	gereflecteerd W m <sup>2</sup>	langgolvig inkomend W m <sup>2</sup>	geemiteerd W m <sup>2</sup>	
1	10:07 - 10:37	gras, schaduw, terheijdenseweg 439	1.9	0.4	-243	48	40	14	-264
2	10:42 - 11:02	gras, volle zon, terheijdenseweg 439	2.5	1.2	-15	-8	19	20	-7
3	11:07 - 11:22	rode klinkers, Terheijdenseweg 439	5.8	0.1	-19	-46	12	40	-1
4	11:47 - 12:13	grijze klinkers, Hekoord, hoek Komoord	2.7	1.2	-20	-29	42	28	23
5	12:27 - 12:47	grijze klinkers, Hekoord 17, 10 m uit gevel	3.1	2.0	-18	-37	27	28	17
6	12:52 - 13:07	rode klinkers, Hekoord 17, 5 m uit gevel	5.0	1.2	-34	-64	27	33	25
7	13:12 - 13:42	rode klinkers, Hekoord 17, 1 m uit gevel	7.4	1.8	-44	-72	61	47	41
8	13:57 - 14:17	rode klinkers, Hekoord 17, 7 m uit gevel	2.8	1.3	-28	-68	21	31	29
9	14:47 - 15:22	grijze klinkers, Laagerf 46	4.6	1.7	-26	-68	12	39	15
10	15:37 - 16:37	grijze klinkers, Meerkoet 8	7.2	2.6	-18	-63	13	58	1

De bodemtemperatuurmetingen uit hetzelfde onderzoek (Van der Molen en Kooi 2008) geven aan dat gemiddeld over de meetperiode de temperatuur onder gras 1,7 °C hoger is dan onder plantsoen en onder bestrating 2,8 °C graden hoger. Het betreft hier metingen binnen korte afstand op hetzelfde terrein. Verwacht mag worden dat de verschillen tussen bestrating in de stad en gras of plantsoen (vermoedelijk vergelijkbaar met natuurlijke begroeiing) buiten de stad groter zullen zijn. Opgemerkt wordt dat de metingen alleen in de zomerperiode gedaan zijn (verschillen zullen dan waarschijnlijk groter zijn dan in de winter) en dat het type bestrating (type klinkers, asfalt, stoeptegels, etc.) ook bepalend zal zijn.

De invloed van het type bestrating op de oppervlaktetemperatuur is onderzocht in de Verenigde Staten. In figuur 2.3 zijn de verschillen in oppervlaktetemperatuur weergegeven voor verschillende types bestrating in Phoenix, Arizona (VS). Hieruit blijkt dat de oppervlaktetemperatuur sterk afhankelijk is van materiaaleigenschappen. De temperatuur voor de verschillende soorten bestrating die beschouwd zijn (asfalt, beton, etc.) kan bijna 20 °C verschillen. Daarom is het van belang om de locaties waar de metingen ten behoeve van onderzoek naar UHI zijn gedaan worden meegenomen in de discussie. De temperatuur kan volgens het onderzoek boven bepaalde soorten asfalt oplopen tot meer dan 60 °C (in Nederland zal dit waarschijnlijk minder zijn dan in Phoenix), terwijl de oppervlakte temperatuur naast deze asfaltweg boven een plantsoen veel lager kan zijn.



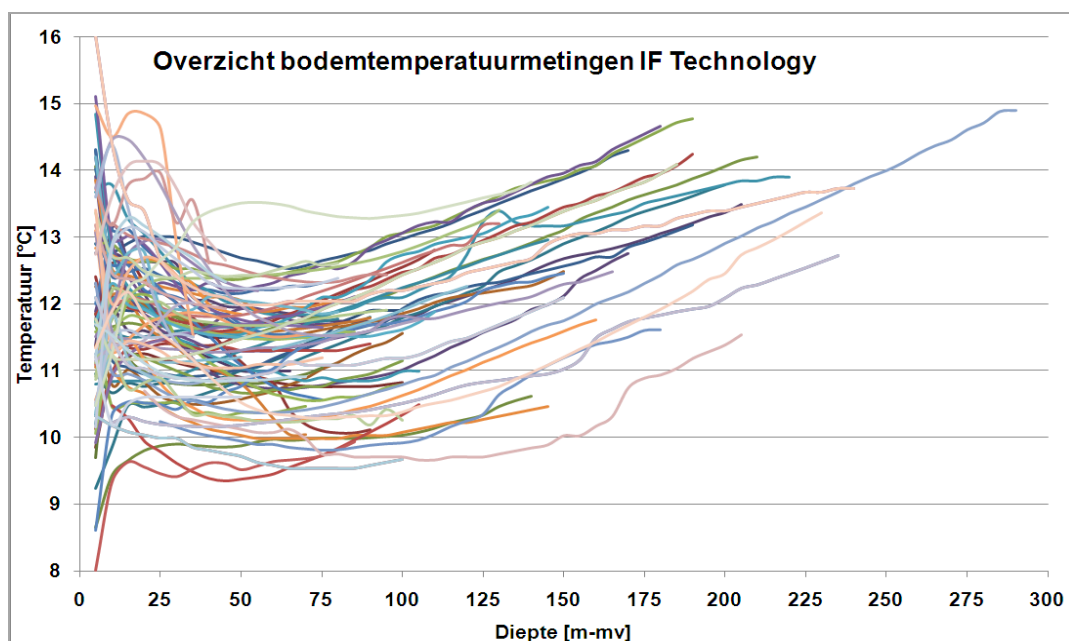
**figuur 2.3** Oppervlakte temperatuur en albedo voor verschillende soorten bestrating in Phoenix, Arizona. (naar data van Jay S. Golden en Kamil Kaloush, SMART Program, en Arizona State University, July 24, 2004, door Cambridge Systematics, Inc) (<http://www.heatislandmitigationtool.com>)

Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat het aardoppervlak in de stad niet alleen bestaat uit gras, plantsoen en bestrating, maar ook uit bebouwing. Van de oppervlaktetemperatuur onder bebouwing is geen informatie beschikbaar. Wel mag worden verwacht dat de gemiddelde oppervlaktetemperatuur onder bebouwing duidelijk hoger is. Dit volgt niet alleen uit de temperatuur in de gebouwen. Ook metingen van de bodemtemperatuur geven aan dat deze nabij gebouwen verhoogd is (zie bv. Ferguson en Woodbury, 2004 en de metingen in het kader van MMB in Utrecht). Hoe veel hoger die temperatuur gemiddeld zal zijn is niet bekend.

Geconcludeerd wordt dat op basis van de luchttemperaturen een gemiddeld UHI-effect op jaarbasis wordt verwacht van 1 à 2 °C voor een stad als Utrecht. Het gemiddelde UHI-effect in de oppervlaktetemperatuur in steden is vermoedelijk echter groter. Hoe veel groter is echter niet duidelijk. Om meer duidelijkheid te verkrijgen is daarom gebruik gemaakt van een groot aantal temperatuurmetingen uitgevoerd in proefboringen (zie paragraaf 3.3) en met divers (zie paragraaf 3.4).

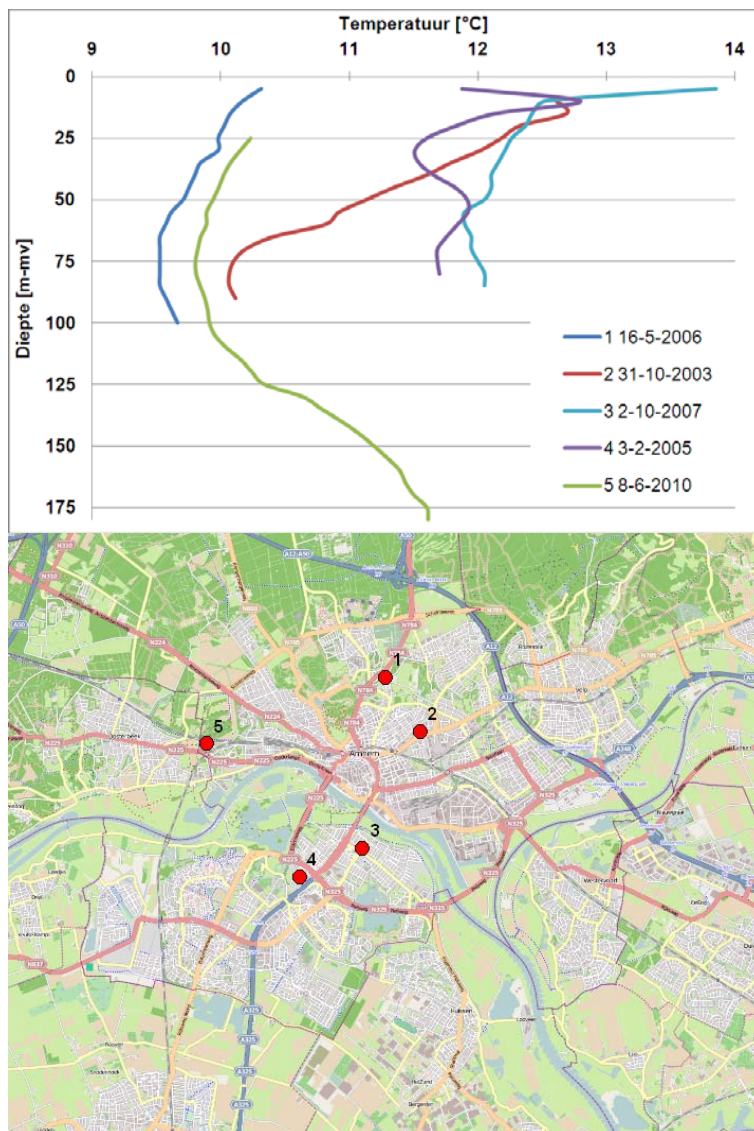
### 2.3 Meetgegevens bodemtemperatuurprofielen

In de jaren '70 zijn bodemtemperatuurmetingen uitgevoerd door TNO (Van Dalfsen, 1981). In dit onderzoek is door heel Nederland een groot aantal metingen verricht in diepe peilbuizen en is de temperatuurverdeling in Nederland in beeld gebracht tot 250 m diepte. IF Technology beschikt ondertussen ook over een groot aantal bodemtemperatuurprofielen. De resultaten van een groot aantal bodemtemperatuurprofielen die door IF Technology zijn gemeten staan in figuur 2.4. Hieruit blijkt dat sprake is van een aanzienlijke ruimtelijke variatie in bodemtemperatuur, ook op grotere diepte. De metingen geven op grote diepte een bandbreedte aan temperaturen van ongeveer 3-3,5 °C (bv. op 50 m-mv 9,5-12,5 °C en op 125 m-mv 10-13,5 °C) (voor locatie en legenda, zie bijlage).



**figuur 2.4 Bodemtemperaturen van referentiemetingen WKO-locaties IF Technology (1992-2011)**

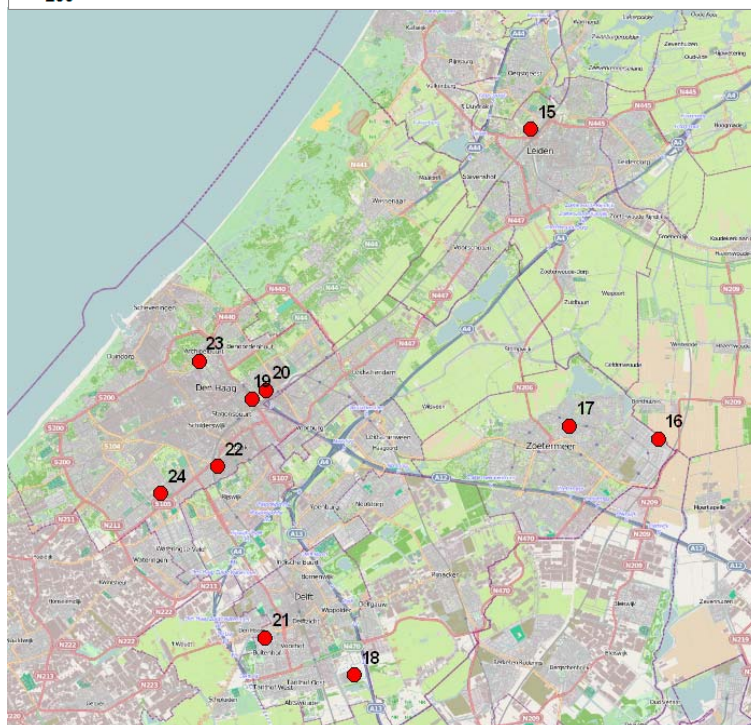
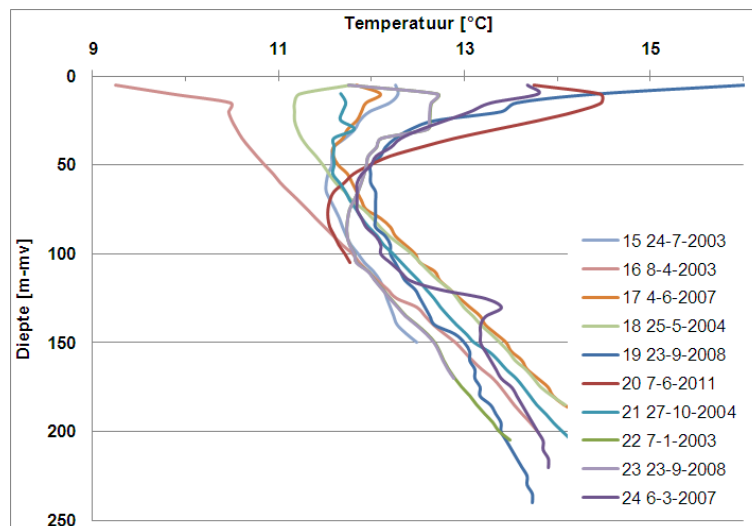
Voor een aantal steden met meerdere metingen zijn de beschikbare bodemtemperatuurmetingen geplot in onderstaande figuren.



**figuur 2.5** Boven: Gemeten bodemtemperaturen Arnhem  
Onder: Locatie metingen

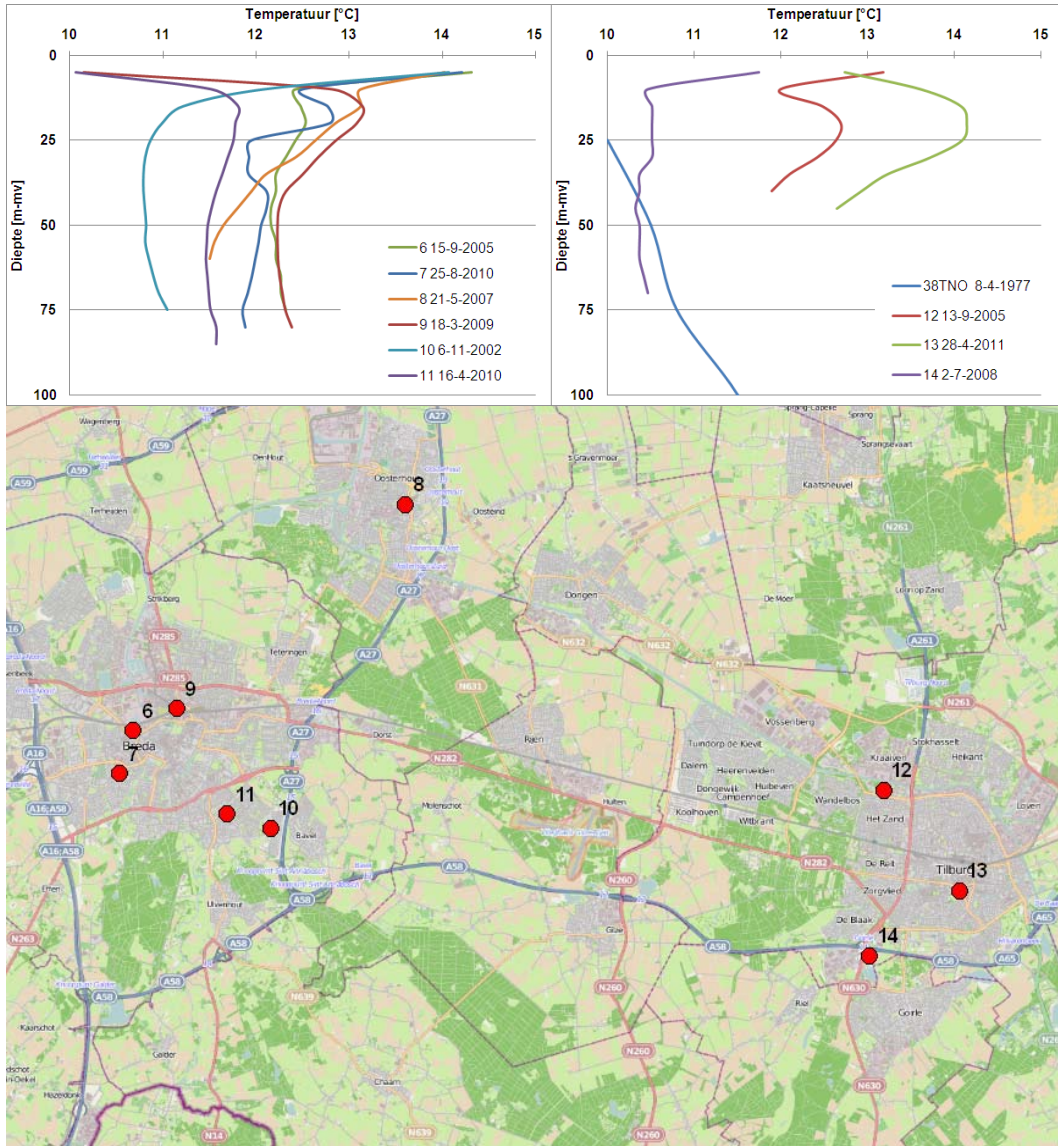
De bodemtemperatuur in de stad (figuur 2.5; locaties 2, 3 en 4) blijkt hoger dan de bodemtemperatuur aan de rand van Arnhem (1 en 5). Hierbij is van belang dat het grondwater van noord naar zuid stroomt, waardoor de metingen aan de noordkant van de stad niet of nauwelijks beïnvloed zijn door het stedelijk warmte-eiland effect. De metingen aan de noordrand van de stad (1 en 5) geven dan ook de laagste temperaturen en de metingen in het zuiden (3 en 4) de hoogste temperaturen (figuur 2.5). Op 25 m-mv is dit verschil 1,8-2,3 °C en op 75 m-mv circa 2 °C.

De bodemtemperatuur van locatie 2 neemt in de diepte sterk af. Op geringe diepte is het grondwater warmer door het stedelijk warmte-eiland. Om het grondwater op grotere diepte op te warmen is meer tijd nodig. Door de relatief hoge snelheid van de grondwaterstroming (circa 50 m/jaar) is de temperatuur daardoor nog relatief laag: het diepere grondwater is nog niet voldoende lang onder het stedelijk gebied om te zijn aangepast aan de oppervlaktetemperatuur.



figuur 2.6 Boven: Bodemtemperaturen omgeving Den Haag  
Onder: Locatie metingen

De bodemtemperaturen in de omgeving van het centrum van Den Haag (figuur 2.6; locaties 19, 20, 22, 23, 24), in een buitenwijk van Delft (18 en 21) en in Zoetermeer (centrum; 17, rand; 16) vertonen geen grote variatie (figuur 2.6). Vanaf 50 m-mv tot grotere diepte is de variatie slechts beperkt tot circa 1 °C. Daarboven is echter wel een tweedeling in bodemtemperatuur te zien: daar zijn de bodemtemperaturen in de omgeving van het centrum van Den Haag duidelijk hoger dan in Zoetermeer en Delft (circa 1 tot 3 °C op 25 m-mv).



**figuur 2.7** Boven: Bodemtemperaturen links Breda en rechts Tilburg  
Onder: Locatie metingen



In figuur 2.7 zijn de bodemtemperatuurmetingen van zowel Breda als Tilburg opgenomen. In beide steden is de grondwaterstroming naar het noorden gericht, zodat voor de metingen aan de zuidkant van de stad de laagste temperaturen te verwachten zijn. Dit blijkt voor de meeste metingen inderdaad op te gaan (Breda: 10 en 11; Tilburg 14). Het meetpunt 13 vormt een uitzondering, vermoedelijk doordat dit meetpunt dicht langs het riviertje de Leij ligt en sprake is van infiltrerend oppervlaktewater met een relatief hoge temperatuur. In het centrum van Breda is de temperatuur hoger dan in de meer zuidelijke metingen: op 25 m-mv is het verschil 1,5 à 2 °C en op 50 m-mv ruim 1 °C. In het centrum van Tilburg (51188) is de temperatuur op 25 m-mv ongeveer 2 °C hoger dan op locatie 14. Ter illustratie van het verloop van de bodemtemperatuur op grotere diepten is ook een meting toegevoegd die in de jaren '70 is uitgevoerd door TNO (Eindhoven). Door de relatief grote afstand is deze meting verder niet direct vergelijkbaar met de andere metingen.

### Meetgegevens rond de pilot-locaties

Door de gegevens van nabijgelegen metingen uit de jaren '70 in het buitengebied te vergelijken met metingen in de stad kan een indruk worden verkregen van het UHI-effect in de diepere ondergrond. Hierbij zijn vooral de metingen in stadscentra van belang.

De bodemtemperaturen in de omgeving van de MMB-pilotlocaties (figuur 2.8) zijn in figuur 2.9 weergegeven.

Van de metingen in Utrecht is met name de centrumlocatie van belang. Op 20 m-mv, waar de seizoensfluctuaties geen rol meer spelen, is de temperatuur hier 2,5 à 3,5 °C hoger dan in het meetpunt van TNO buiten de stad. Een deel van het verschil (ongeveer 0,8 °C) is te verklaren uit de klimaatverandering die tussentijds is opgetreden. Voor de centrumlocatie geldt op basis van deze metingen en UHI-effect van ongeveer 1,7 à 2,7 °C. Dit wordt bevestigd door de meting bij Datus (destijds nog buitengebied ter plaatse van het nieuw te bouwen Leidsche Rijn), die op 20 m-mv een ongeveer 2 °C lagere temperatuur geeft.



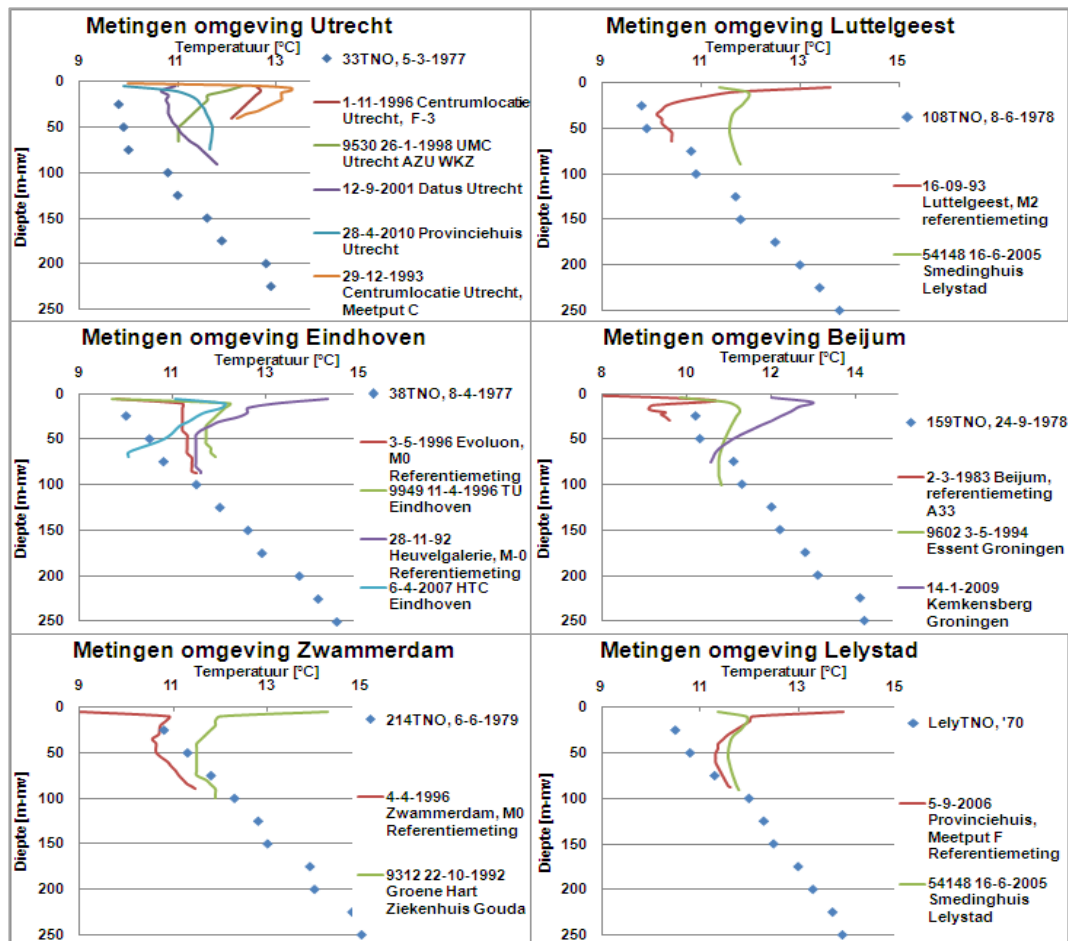
**figuur 2.8** Locaties gebruikte metingen van IF Technology (rood) en metingen van TNO uit de jaren '70 (zwart)

De metingen in het centrum van Eindhoven (Heuvelgalerie) geven een verschil van 2,5 °C ten opzichte van de metingen van TNO in de jaren '70. Ook hier is ongeveer 0,8 °C daarvan het gevolg van klimaatverandering en is het UHI-effect ongeveer 1,7 °C.

De metingen rond Zwammerdam laten zien dat de bodemtemperatuur in Gouda ongeveer 1 °C hoger ligt dan die in Zwammerdam. Opvallend is dat de temperatuur in het profiel van TNO uit de jaren '70 relatief hoog ligt, waarbij moet worden opgemerkt dat deze buis op vrij grote afstand ligt.

Extrapolatie van de temperatuurprofielen in Lelystad geeft een temperatuurverschil van ongeveer 2 °C aan de oppervlakte. Hiervan is een belangrijk deel (ongeveer 1,4 °C) te verklaren uit de opgetreden klimaatverandering in de tussenliggende periode van 35 jaar, zodat nog ruim 0,5 °C resteert voor het UHI-effect. Dit is een relatief klein UHI-effect, waarbij moet worden bedacht dat Lelystad een relatief open stad is, waar geen groot UHI-effect te verwachten is.

De gegevens uit Groningen komen uit wijken buiten het centrum. Opvallend is het verschil van ongeveer 1,3 °C tussen de metingen bij Essent (1994) en het op korte afstand daarvan gelegen project Kemkensberg (2009). Slechts ca. 0,6 °C hiervan kan worden verklaard uit de tussentijds opgetreden klimaatverandering, zodat 0,7 °C resteert als lokaal verschil. Het verschil tussen de meting van 2009 en de metingen van TNO (1978) en Beijum (1983) is op 20 m diepte 2 à 3 °C, respectievelijk 0,8 à 2,0 °C na correctie voor de tussentijds opgetreden klimaatverandering. In Groningen lijkt op een locatie buiten het centrum al sprake van een UHI-effect van 1 à 2 °C.



**figuur 2.9** Het verloop van de bodemtemperatuur in de omgeving van de verschillende locaties; recente metingen van IF Technology, metingen van projecten van IF Technology in de omgeving en metingen van TNO uit de jaren '70

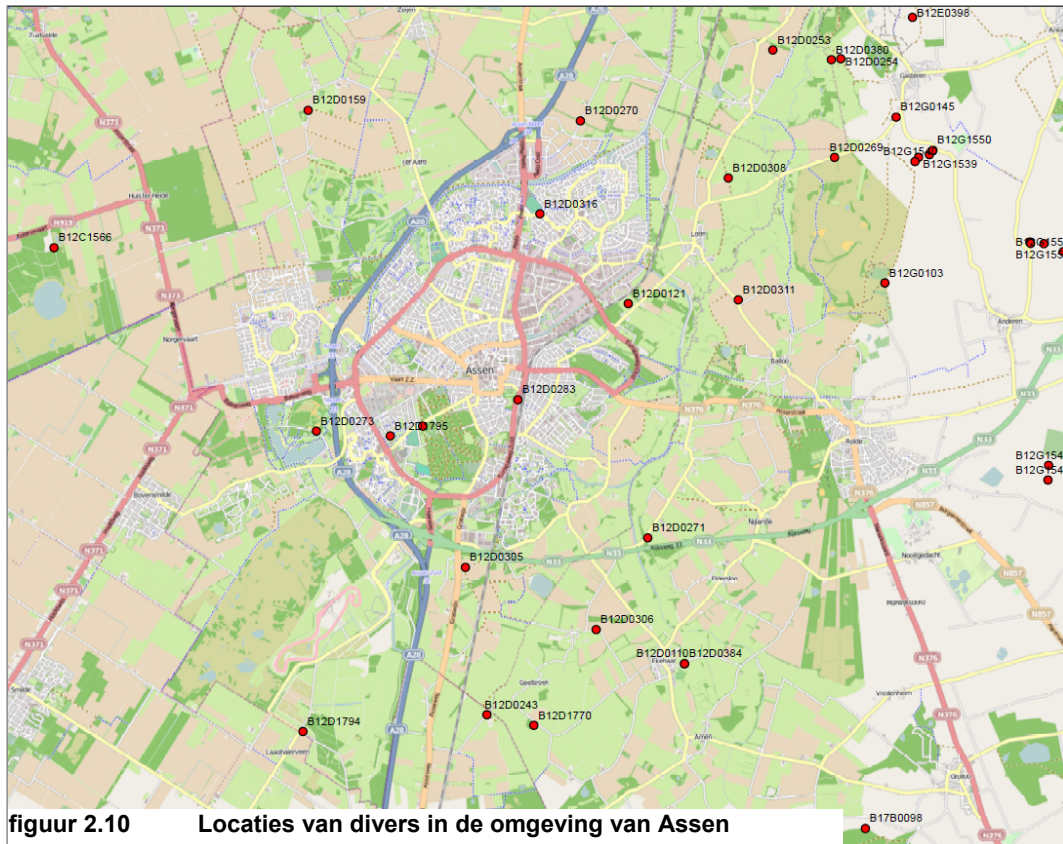
Uit deze gegevens volgt een minimaal UHI-effect van 0,5 °C voor een open stad zoals Lelystad, circa 2 °C voor Eindhoven, > 2 °C voor Groningen en 2 à 2,5 °C voor Utrecht. In de centra van de grote steden (Amsterdam, Rotterdam, Den Haag) zou het effect nog wat groter kunnen zijn tot maximaal 3 °C. Recent onderzoek door Visser et al. (2011) past goed in deze reeks: volgens zijn gegevens is de oppervlaktetemperatuur in een 50 jaar oude stadswijk meer dan 1,5 °C verhoogd.

Opgemerkt moet worden dat de meetlocaties vaak gerealiseerd worden in groenstroken, waardoor de plaatselijke oppervlaktetemperatuur mogelijk nog relatief laag is en het UHI-effect enigszins wordt onderschat. Daar staat tegenover dat op grotere diepte enige uitmiddeling mag worden verwacht: de temperatuur op diepte wordt waarschijnlijk niet alleen bepaald door het oppervlak recht boven het meetpunt.

## 2.4 Meetgegevens divers

Naast de informatie uit bodemtemperatuurprofielen is informatie verzameld die in grondwatermeetnetten is geregistreerd met behulp van divers. Deze grondwatermeetnetten zijn bedoeld om informatie over grondwaterstanden te verzamelen. De automatische drukopnemers (divers) die daarbij worden gebruikt meten ook de temperatuur op de diepte waarop ze zijn aangebracht. Deze informatie wordt in feite onbedoeld geregistreerd en kan interessant zijn voor het in beeld brengen van verschillen in de gemiddelde bodemtemperatuur.

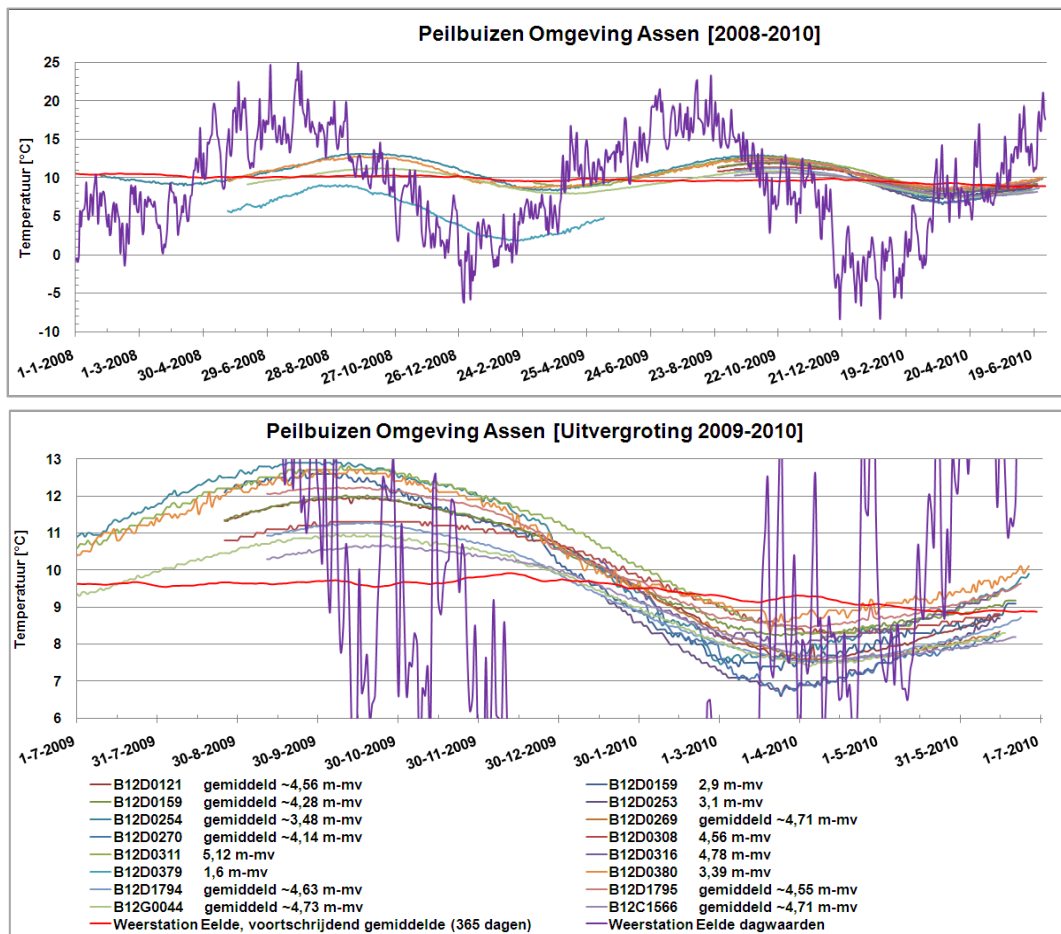
In dit hoofdstuk is aan de hand van de divergegevens van het diversnetwerk in Drenthe een overzicht gegeven van de informatie over de temperatuurverdeling in de Drentse ondergrond. Hierbij is geconcentreerd op de omgeving van Assen, omdat zich daar enkele meetpunten in stedelijk gebied bevinden (figuur 2.10). De bruikbaarheid voor dit onderzoek wordt door meerdere aspecten bepaald. De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de metingen is belangrijk, omdat het UHI-effect in de stedelijke gebieden van Drenthe mogelijk beperkt is. Ook is een ruimtelijke spreiding van de metingen nodig met zowel binnen als buiten het stedelijk gebied meetpunten. Aangezien de divers op enkele meters diepte zijn aangebracht is de invloed van de jaarlijkse temperatuurfluctuatie nog merkbaar, waardoor ook in de tijd een voldoende lange continue meetreeks over dezelfde periode nodig is voor de te vergelijken meetpunten. Belangrijk aandachtspunt bij de analyse is ook de diepte waarop de diver zich bevindt, aangezien een temperatuur golf vertraagd in de diepte doorwerkt. Het over dezelfde periode vergelijken van twee divers van een verschillende diepte kan daardoor toch een verschillend temperatuursgemiddelde opleveren.



**figuur 2.10** Locaties van divers in de omgeving van Assen

Om de bruikbaarheid te beoordelen zijn de locaties en gegevens van de meetpunten geanalyseerd. Via eenvoudige modellen (1D analytisch) is beoordeeld of aan de hand van de dagelijks en jaarlijkse gang van de temperatuur – en eventuele verschillen op verschillende dieptes van hetzelfde meetpunt – een herleiding van de lokale oppervlakte-temperatuur gemaakt kan worden.

Een analyse van de maaielddtemperaturen en eventueel luchttemperaturen van het KNMI levert mogelijk een patroon op waaruit een UHI-effect kan worden afgeleid. In figuur 2.11 is het verloop van de bodemtemperatuur in de omgeving van Assen op basis van de divergegevens weergegeven over de periode 2009-2010 én luchttemperaturen afkomstig van het weerstation Eelde (KNMI). Om voldoende betrouwbare gemiddelden te kunnen afleiden zijn alleen de divers met een meetperiode van circa een jaar en langer geselecteerd. Daardoor is slechts een deel van de beschikbare meetpunten geselecteerd.



**figuur 2.11** Boven: Temperatuurgegevens divers omgeving Assen (bron: Provincie Drenthe), luchttemperaturen Eelde en voortschrijdend jaargemiddelde Eelde (bron: KNMI). Onder: uitvergroting temperatuurbereik 6-13 °C. De diepte van de meting wordt aangegeven in de legenda; indien er 'gemiddeld' staat, betekent dit dat er meerdere divers op één locatie hingen op ongeveer dezelfde diepte (tot 20 cm verschil) en er een gemiddelde genomen is van de divers

De fluctuatie van de bodemtemperatuur is duidelijk vertraagd ten opzichte van de luchttemperatuur. Verder is er een bandbreedte van circa 2,5 °C waarbinnen de bodemtemperaturen variëren, die niet te verklaren is uit verschillen in de diepte waarop de diver is aangebracht. De verschillen in bodemtemperatuur moeten dus te verklaren zijn door verschillen in de oppervlaktetemperatuur of door meetfouten. In bijlage II is een analyse van de meetnauwkeurigheid en de drift van de divermetingen weergegeven. Hieruit volgt dat de meeste divers vrij nauwkeurig meten en een beperkte drift vertonen. Er zijn echter ook divers die relatief grote afwijkingen vertonen en divers die een grote drift hebben. De resultaten moeten daarom met enige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. Het landgebruik van de locaties waar de divers geplaatst zijn, is opgenomen in tabel 2.3.

**tabel 2.3 Landgebruik, XY coördinaten en gemiddelde temperaturen van de divers uit de omgeving van Assen**

Meetpunt	Tmin [°C]	Tmax [°C]	Tgem [°C]	Landgebruik	Aantal peilbuizen	(gemiddelde) meetdiepte [m-mv]
B12C1566	7,6	10,7	9,2	Bos	4	4,7
B12D0269	7,5	10,0	8,8	Bos (vlakbij een weg)	2	4,7
B12G0044	7,4	11,3	9,4	Bos	2	4,7
B12D0308	8,3	11,3	9,8	Bos (tussen weilanden)	1	4,6
B12D0121	7,5	12,0	9,8	Weiland	4	4,6
B12D0159	8,2	12,0	10,1	Weiland	4	4,3
B12D0254	7,5	13,2	10,3	Weiland	2	3,5
B12D0311	8,2	12,8	10,5	Weiland	1	5,1
B12D0379	1,9	9,0	5,5*	Weiland	1	1,6
B12D0380	8,3	12,9	10,6	Weiland	1	3,4
B12D1794	7,5	11,3	9,4	Weiland	5	4,6
B12D1795	8,4	12,2	10,3	Gras (aan de rand van Assen)	7	4,6
B12D0316	7,9	10,3	9,1	Assen (naast een weg, tussen een woonwijk en wat weilanden)	1	4,8

\* Dit lijkt een onwaarschijnlijk laag gemiddelde. Oorzaak onbekend: mogelijk meetfout.

Wanneer bovenstaande jaargemiddelde bodemtemperaturen vergeleken worden met de locatie van de divers en het landgebruik, is geen duidelijk verband te zien tussen stedelijk en niet-stedelijk gebied. De gemiddelde bodemtemperaturen lijken onafhankelijk van landgebruik te variëren. Overigens liggen de divers in Assen niet in het echte stedelijke gebied, maar meer aan de rand van de stad en bij groenvoorzieningen. Getracht is om via de gemeente Assen meetgegevens te verkrijgen uit het netwerk van de stad, maar dit is niet gelukt.

Wel is in de metingen goed te zien hoe de seizoenale fluctuaties dempt en wordt vertraagd in de diepte. Globaal geldt: hoe dieper de divermeting, hoe kleiner de seizoenale fluctuaties van de bodemtemperatuur en hoe groter de vertraging. Opvallend is de lage gemiddelde temperatuur bij B12D0379, gemeten op 1,6 m-mv, waar een gemiddelde jaartemperatuur van 5,5 °C is gemeten, een minimum van 1,9 °C en een maximum van 9,0 °C. De lage minimumtemperatuur van 1,9 °C zou verklaarbaar kunnen zijn vanwege de beperkte diepte van de meting en de lage oppervlaktetemperatuur gedurende de winter. In dat geval zou de maximumtemperatuur in de zomermaanden echter ook dicht bij de oppervlaktetemperatuur moeten liggen, wat niet het geval is. De gemiddelde temperatuur ligt daardoor erg laag (4 °C lager dan het voortschrijdend jaargemiddelde van de luchttemperatuur (Eelde, KNMI)). Dit is een onwaarschijnlijke afwijking en zou kunnen duiden op een meetafwijking, waardoor de betrouwbaarheid van deze divermetingen ter discussie staat. In dit meetpunt is bovendien maar 1 diver aanwezig, zodat er geen controle mogelijk is op basis van een andere diver. Deze grote afwijking is nu duidelijk zichtbaar door een onwaarschijnlijk laag gemiddelde.

Voor andere divers met kleinere afwijkingen zal dit niet altijd duidelijk zijn. Dit betekent dat de divergegevens maar beperkt betrouwbaar zijn. In feite kunnen alleen gegevens worden gebruikt uit meetpunten met meerdere divers, die vergelijkbare temperaturen geven. Voor de meeste meetputten met meerdere divers zijn de verschillen overigens niet groot (zie bijlage). Ook de enige meting die beschikbaar is in Assen is gebaseerd op één diver, wat een lagere betrouwbaarheid betekent.

Geconcludeerd wordt dat uit de divergegegevens geen UHI-effect voor Assen af te leiden is. Een belangrijke reden hiervoor is het ontbreken van divers in het centrum van de stad. Ook de meetafwijkingen kunnen hieraan hebben bijgedragen.

## 2.5 Conclusie

Voor de berekening in hoofdstuk 4 wordt uitgegaan van de gegevens over de klimaatverandering, zoals verwoord in paragraaf 3.1. Voor de omvang van het stedelijk warmte-eiland effect wordt uitgegaan van een bandbreedte van 1 tot 3 °C. Ook is een keuze voor het verloop in de tijd nodig, maar daarover is geen informatie beschikbaar.

Wel is informatie beschikbaar over de oorzaken: afname van het aandeel groen op de totale oppervlakte, toename van het aandeel verhard oppervlak (beide ook van invloed op de verdamping), warmteproductie door de mens en invloed van bebouwing op de ingaande en uitgaande straling. Toename van het effect heeft bovendien te maken met de groei van de omvang van de stad. Veel van deze invloeden zijn niet of nauwelijks tijdsafhankelijk. Het energieverbruik door de mens en de groei van de omvang van de stad zijn in de loop van de tijd wel duidelijk veranderd. Het lijkt daarom niet logisch om hetzelfde verloop te kiezen als de klimaatverandering, met een sterke toename van het effect vanaf halverwege de jaren '70. Daarom is ervoor gekozen om uit te gaan van een lineaire groei vanaf nul in 1900 tot 1 à 3 °C in 2010. Naar de toekomst is aangenomen dat deze lineaire stijging zich voortzet. In tabel 2.4 worden de gekozen uitgangspunten getoond.

**tabel 2.4**      **Uitgangspunten berekeningen autonome opwarming**

Periode	Opwarming door klimaatverandering [°C/jaar]	UHI 1 °C in 2010 [°C/jaar]	UHI 3 °C in 2010 [°C/jaar]	Totaal bij UHI 1 °C [°C/jaar]	Totaal bij UHI 3 °C [°C/jaar]
1900-1975	0,0045			0,0136	0,0318
1976-2010	0,035	0,0091	0,0273	0,0479	0,0661
2010-2040	0,035			0,0479	0,0661
Totaal 1900-2010	1,7 °C	1,0 °C	3,0 °C	2,7 °C	4,7 °C
Totaal 1900-2040	2,86 °C	1,27 °C	3,82 °C	4,13 °C	6,68 °C

## 3 Analyse omvang effecten

In dit hoofdstuk zijn, aan de hand van de uitgangspunten uit tabel 2.4, de effecten van de autonome opwarming op de bodemtemperatuur bepaald. De berekeningen en de resultaten daarvan zijn beschreven in paragraaf 4.1. Het gaat hierbij om de opwarming van de bodem die is opgetreden sinds 1900 en ook de opwarming die in de komende 30 jaar nog verwacht mag worden.

In paragraaf 4.2 is een vergelijking gemaakt tussen enerzijds de hoeveelheid energie die aan de bodem is toegevoegd (en in de toekomst nog wordt toegevoegd) door de stijgende temperatuur aan de oppervlakte en anderzijds de warmtevraag van de bebouwing aan de oppervlakte. Deze vergelijking is relevant in verband met vragen omtrent de energiebalans van WKO, die momenteel wordt voorgeschreven. Voor de warmtevraag aan de oppervlakte is gebruik gemaakt van kentallen van het CBS over het aardgasverbruik in Rotterdam (stedelijk gebied) en de provincie Drenthe (voornamelijk landelijk gebied).

### 3.1 Verandering in oppervlaktetemperatuur: klimaatverandering en verstedelijking

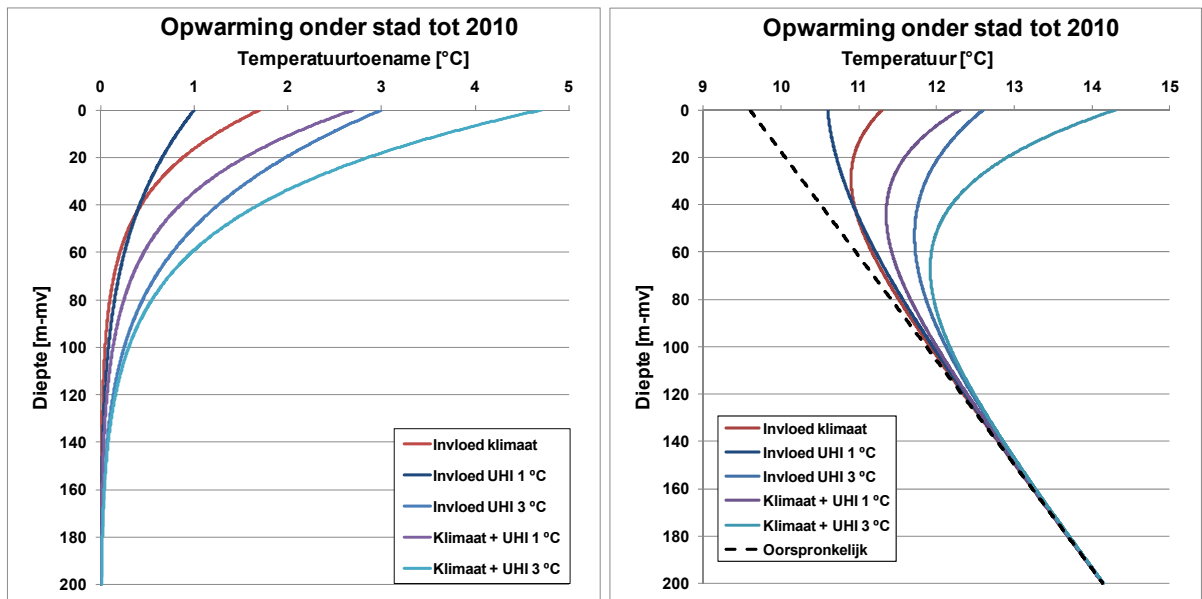
Uitgangspunt voor de berekeningen zijn de kentallen uit tabel 2.4, waarbij 2 scenario's zijn doorgerekend voor het UHI-effect: één met een UHI-effect van 1 °C in 2010 en één met een UHI-effect van 3 °C in 2010. Daarnaast is onderscheid gemaakt in de opwarming die in het verleden is opgetreden (1900-2010) en de opwarming die de komende 30 jaar mag worden verwacht (2011-2040).

Voor de berekeningen is gebruikt gemaakt van de analytische vergelijking voor een lineair stijgende temperatuur aan de oppervlakte van Carslaw en Jaeger uit 1959 (Stolk, 2000). De berekening gaat uit van een oneindig dikke plaat waarvan de temperatuur aan de bovenzijde stijgt.

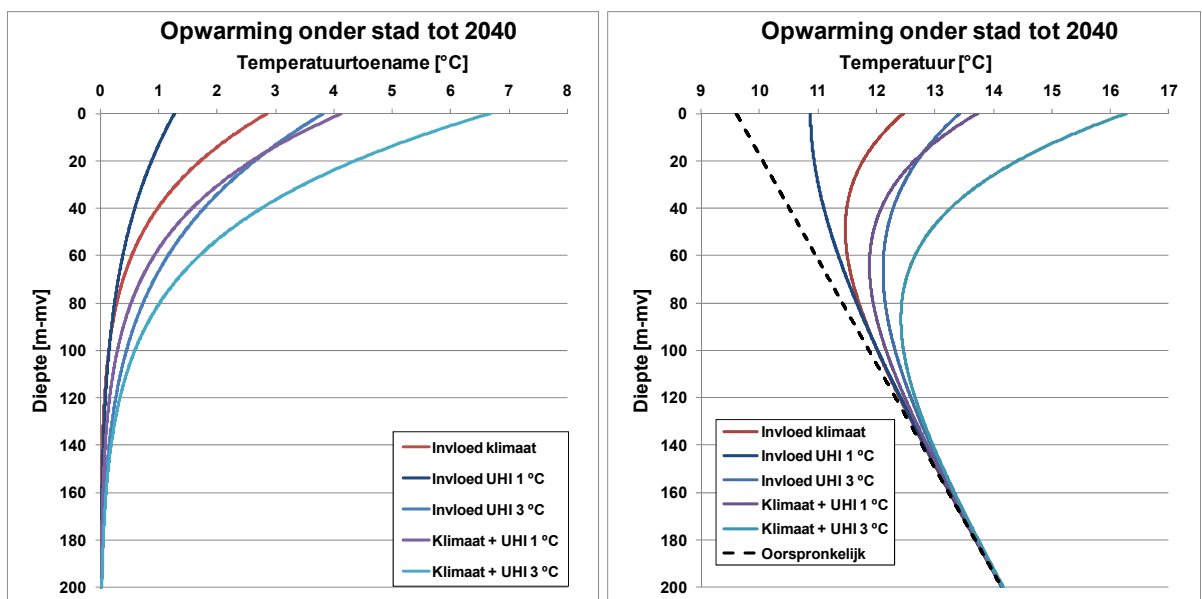
Voor de bodemeigenschappen zijn in alle berekeningen vaste waarden gebruikt die representatief zijn voor de Nederlandse situatie. Voor de warmtecapaciteit is 2,4 MJ/(m<sup>3</sup> °C) aangehouden en voor de warmtegeleidingscoëfficiënt 2,2 W/(m °C).

De berekende opwarming in de diepte die is opgetreden tussen 1900 en 2010 wordt getoond in figuur 3.1 en de totale opwarming sinds 1900 die verwacht wordt voor 2040 in figuur 3.2, waarbij zowel de afzonderlijke effecten van klimaatverandering en het stedelijk warmte eiland effect in beeld zijn gebracht als het gezamenlijke effect.





**figuur 3.1** Berekende toename van de bodemtemperatuur (links) en absolute bodemtemperatuur (rechts) in stedelijk gebied in 2010 ten opzichte van 1900 (gebruikte vergelijking: Carslaw and Jaeger, 1959, blz. 63)

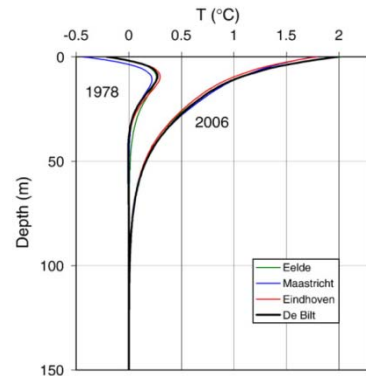


**figuur 3.2** Berekende toename van de bodemtemperatuur (links) en absolute bodemtemperatuur (rechts) in stedelijk gebied in 2040 ten opzichte van 1900 (gebruikte vergelijking: Carslaw and Jaeger, 1959, blz. 63)

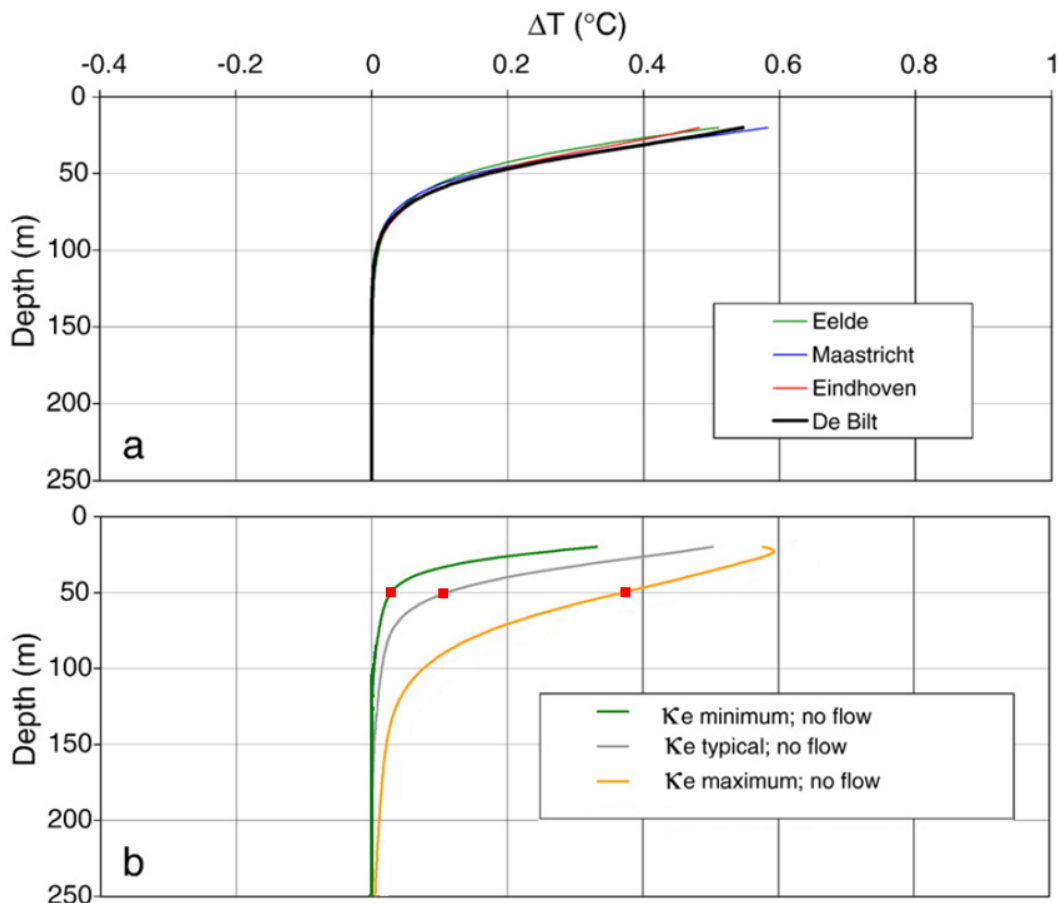
Uit figuur 3.1 blijkt dat, afhankelijk van het scenario, een significante opwarming ( $>0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) is opgetreden tot een diepte van 60 tot 90 m. De bodemtemperatuur onder de stad in 2040, zoals weergegeven in figuur 3.2, laat tot een diepte van 80 tot 110 m-mv een significante temperatuuroptocht zien.

Om te verifiëren of de aangenomen temperatuurveranderingen als gevolg van klimaatverandering reëel zijn, kunnen deze vergeleken worden met de resultaten uit het onderzoek van Kooi (2008); deze zijn in niet-stedelijke gebied gemeten en geven dus de temperatuurverandering als gevolg van klimaatverandering weer (figuur 3.3 en figuur 3.4).

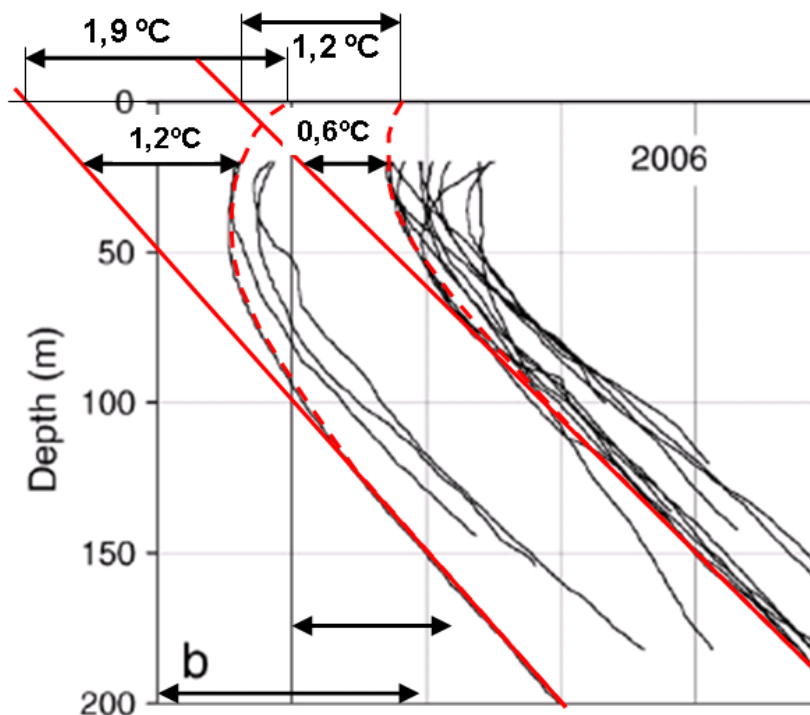
Op 50 meter diepte is als gevolg van klimaatverandering na 28 jaar dus een opwarming van 0,03 tot 0,36 °C zichtbaar (afhankelijk van de mate van thermische diffusiviteit). Bij de analytische berekeningen in dit rapport is uitgegaan van 0,14 °C opwarming van de bodemtemperatuur op 50 m-mv in de periode 1976-2010 als gevolg van klimaatverandering. Deze in de berekeningen gebruikte opwarming kan dus al betrouwbaar en reëel beschouwd worden.



**figuur 3.3**  
Berekende bodemtemperatuurgegevens (1978 en 2006) afgeleid van de SAT voor 4 meteo-stations (Kooi, 2008)



**figuur 3.4** Gesimuleerde temperatuurveranderingen in de ondergrond. (a) Gevoeligheid voor de ruimtelijke variaties van SAT (Surface Air Temperature). De curven geven het verschil tussen 1978 en 2006 zoals getoond in figuur 3.3. (b) De gevoeligheid voor thermische diffusie met behulp van 'grenswaarden' en de 300 jaar SAT gegevens van De Bilt. (Kooi, 2008)



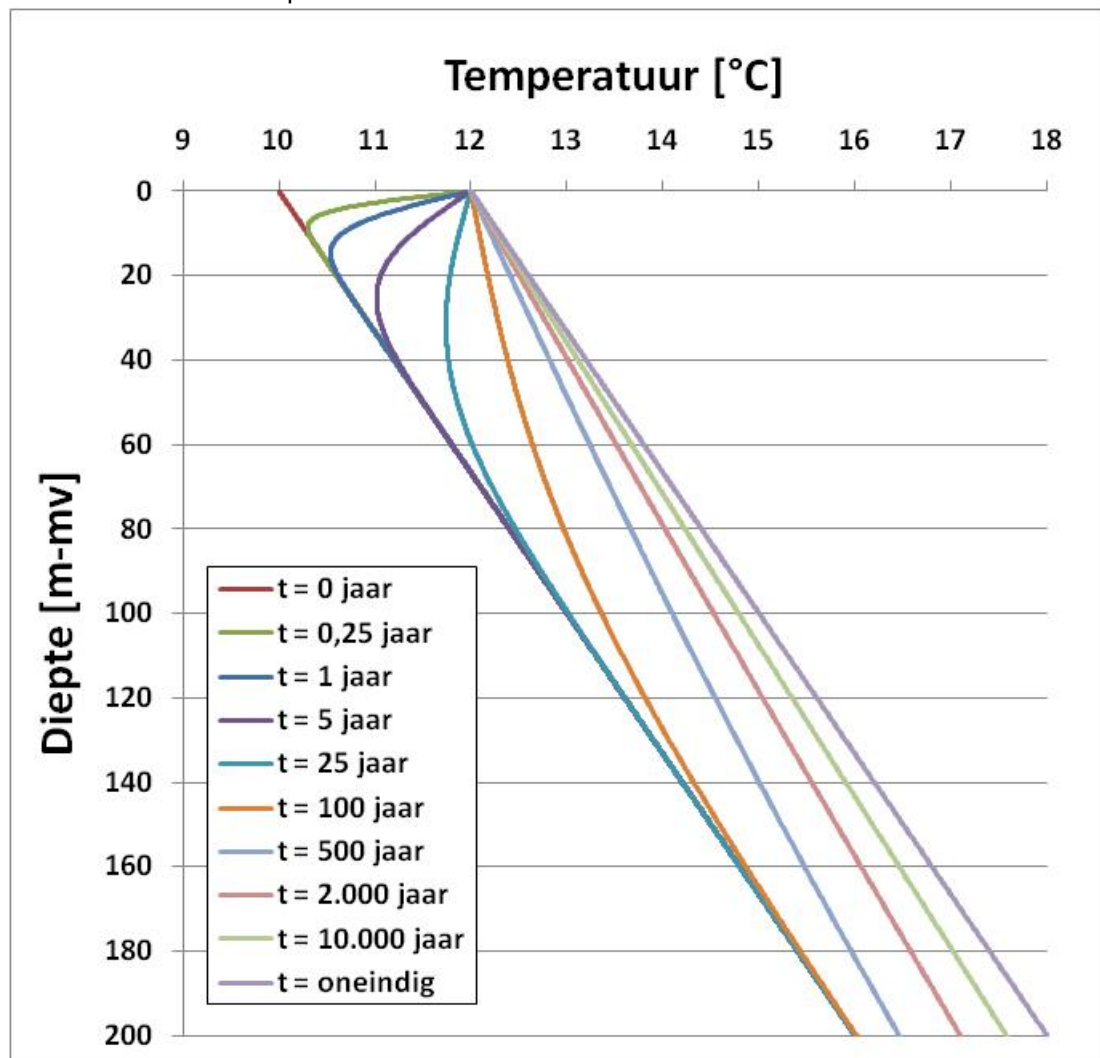
**figuur 3.5** Analyse van de metingen van Kooi (2008). Door het extrapoleren van de diepe geothermische gradiënt naar maaiveld, kan in indruk worden verkregen van de opgetreden opwarming van de ondergrond op verschillende dieptes

Een tweede methode ter controle van de berekeningen is een analyse van de metingen die gepresenteerd zijn in het artikel van Kooi (2008). Bij een constante temperatuur aan de oppervlakte neemt de temperatuur met de diepte bij benadering lineair toe en volgt de geothermische gradiënt. Op grote diepte is de geothermische gradiënt nog niet verstoord, zodat de oorspronkelijke temperaturen in het bovenste deel van de bodem kunnen worden ingeschat door de geothermische gradiënt naar maaiveld door te trekken. De resultaten van de resulterende analyse op de metingen van Kooi (2008) staan in figuur 3.5.

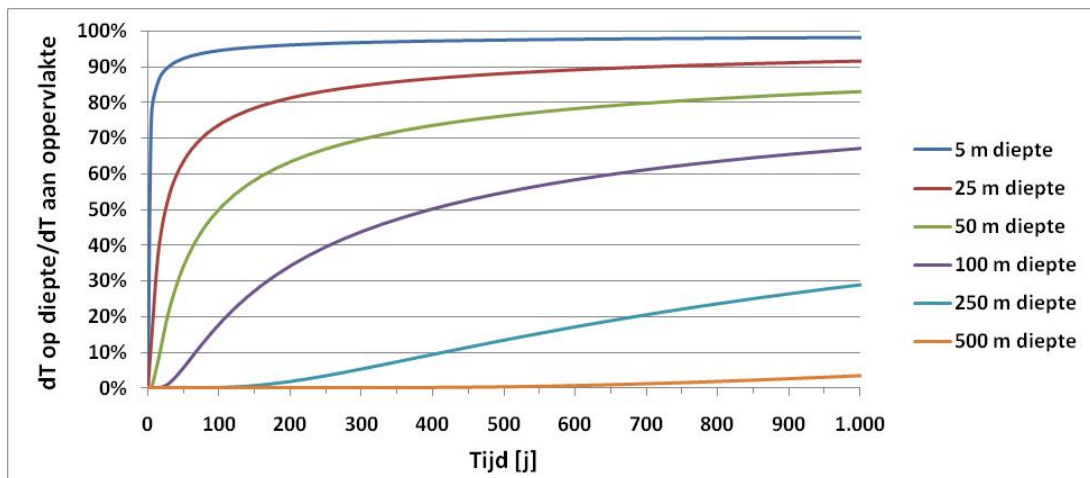
De resultaten geven voor 2006 een temperatuurstijging van 20 m diepte tussen 0,6 en 1,2 °C (gemiddeld 0,9 °C). Aan maaiveld ligt de opwarming in 2006 tussen 1,2 en 1,9 °C. Hierbij moet worden bedacht dat tussen 2006 en 2010 de opwarming zich nog heeft doorgezet. Aan maaiveld was deze opwarming 0,035 °C per jaar. Als hiermee rekening wordt gehouden komt de opwarming aan de oppervlakte in 2010 uit tussen 1,34 en 2,04 °C (gemiddelde is 1,69 °C), wat overeen komt met de berekeningen (1,7 °C opwarming door klimaatverandering). Op 20 m diepte geven de berekeningen in 2010 een opwarming van ongeveer 0,9 °C: ook dit komt goed overeen met de metingen.

### Lange termijn ontwikkeling

Bij een constante (jaargemiddelde) temperatuur aan de oppervlakte zal zich na verloop van tijd een evenwicht instellen. Als de temperatuur aan de oppervlakte oneindig lang constant is, dan zal sprake zijn van een lineaire temperatuurstijging met de diepte: de geothermische gradiënt. Alleen onder invloed van verschillen in de warmtegeleidingcoëfficiënt kunnen (kleine) afwijkingen van het lineaire verloop optreden. Doordat de temperatuur aan de oppervlakte verandert zal de temperatuurverandering in de ondiepe bodemlagen veel sneller verlopen dan in de diepere bodemlagen. Om dit inzichtelijk te maken is met een analytische vergelijking (Jacob, 1964: referentie in Stolk, 2000) berekend hoe de temperatuur in de diepte in de loop van de tijd verandert na een plotselinge temperatuurverandering van 2 °C aan de oppervlakte. De berekende temperaturen zijn weergegeven in figuur 3.6. In figuur 3.7 is de temperatuurverandering in de tijd weergegeven voor een aantal verschillende dieptes.

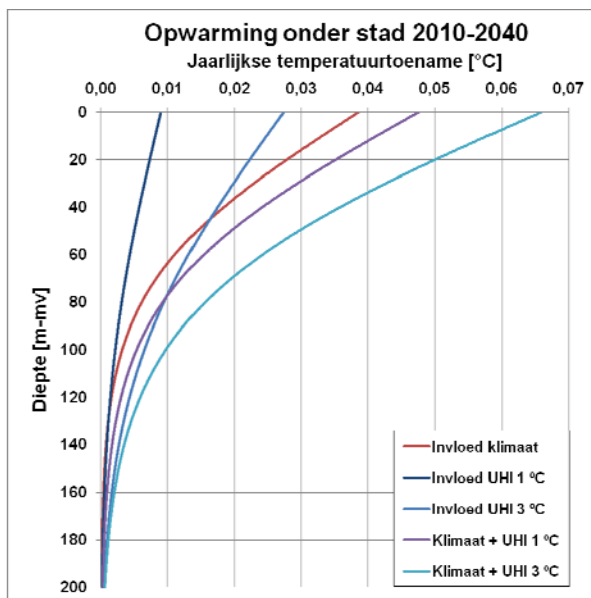


figuur 3.6 Berekende temperatuur in de ondergrond na een plotselinge temperatuurverandering aan de oppervlakte op  $t = 0$ . Voor en na  $t = 0$  is de temperatuur aan de oppervlakte oneindig lang constant



**figuur 3.7** Berekende temperatuurverandering als percentage van de plotseling opgetreden temperatuurverandering aan de oppervlakte op  $t = 0$ . Voor en na  $t = 0$  is de temperatuur aan de oppervlakte oneindig lang constant

Uit de bovenstaande analyse kan worden afgeleid dat de opwarming van de ondergrond zich in de toekomst zal voortzetten, zelfs als de opwarming aan de oppervlakte tot stilstand komt (zie ook Kooi et al., 2011). De opwarming zal net zo lang doorzetten totdat de temperatuurverandering op diepte gelijk is aan de opgetreden temperatuurverandering aan de oppervlakte. De snelheid waarmee de opwarming optreedt is daarbij sterk afhankelijk van de diepte. De gemiddelde opwarmingssnelheid over de komende 30 jaar kan per diepte eenvoudig worden berekend op basis van de resultaten van de berekeningen uit figuur 3.1 en figuur 3.2 (zie figuur 3.8).



**figuur 3.8** Gemiddelde jaarlijkse temperatuurtoename in de ondergrond op basis van de berekende bodemtemperaturen in 2010 en 2040 (weergegeven in figuur 3.1 en figuur 3.2)

In het meest extreme scenario kan de bodemtemperatuur bij een ondiep WKO-systeem (20 m diepte) dus 0,5 °C stijgen in 10 jaar tijd als gevolg van de autonome opwarming. Een dergelijke kleine stijging heeft geen noemenswaardige gevolgen voor het functioneren van een WKO. In veel gevallen is de te verwachten bodemtemperatuur vooraf zelfs niet nauwkeurig bekend. Het opslagrendement van een WKO wordt slechts voor een fractie bepaald door de achtergrond temperatuur. Andere factoren, zoals de temperatuur van de opgeslagen warmte dan wel koude, de mate van water- en energie(on)balans, de snelheid van de grondwaterstroming, de hoeveelheid warmte of koude die wordt opgeslagen en het aantal jaren dat het systeem in bedrijf is, hebben een veel grotere invloed.

### 3.2 Vergelijking autonome opwarming van de bodem met energievraag

Voor de in figuur 3.1 en figuur 3.2 getoonde opwarming van de ondergrond is door de hoge warmtecapaciteit van de ondergrond een grote hoeveelheid energie nodig. De hoeveelheid energie die aan de bodem is toegevoegd en in de toekomst nog wordt toegevoegd door de stijgende temperatuur aan de oppervlakte kan eenvoudig worden berekend en vervolgens worden vergeleken met de energievraag van bebouwing aan de oppervlakte. Deze vergelijking is relevant voor WKO-systemen, aangezien die niet alleen kunnen worden gebruikt om energie in de bodem op te slaan, maar ook om energie aan de bodem te onttrekken. In het huidige beleid geldt voor open WKO-systemen een eis van energiebalans. Dat wil zeggen dat de hoeveelheid warmte die in een bepaalde (langjarige) periode aan de bodem wordt toegevoegd binnen bepaalde marges gelijk moet zijn aan de hoeveelheid warmte die in diezelfde periode aan de bodem wordt onttrokken. Deze energiebalans eis heeft consequenties voor het ontwerp en de bedrijfsvoering van WKO-systemen en staat daarom ter discussie. Het gegeven dat autonome opwarming van de ondergrond plaatsvindt, geeft aan dat ook bij een WKO met een perfecte energiebalans alsnog geen sprake is van een energiebalans in de bodem (de bodem warmt immers op door klimaatverandering en verstedelijking). Dit suggereert dat WKO-systemen wellicht zelfs bewust in onbalans geopereerd kunnen worden om door netto warmte aan de bodem te onttrekken het effect van de autonome opwarming te compenseren. Het is dan wel van belang om inzicht te hebben in de verhoudingen tussen de warmte en koudevraag van de gebouwen aan de oppervlakte (die met WKO kan worden geleverd) en de energie die de bodem opneemt als gevolg van de autonome opwarming.

Allereerst is het begrip 'energetische balans' toegelicht, waarna de autonome opwarming van de bodem vergeleken is met de energievraag aan de oppervlakte, waarbij specifiek is ingegaan op Rotterdam (stedelijk gebied) en de provincie Drenthe (provincie met de laagste bevolkingsdichtheid van Nederland). Op basis hiervan kunnen uitspraken worden gedaan over de verhoudingen tussen de energievraag aan de oppervlakte en de energie input in de bodem door de toename van de oppervlaktetemperatuur.

#### 3.2.1 Energetische balans

De energetische balans geeft het procentuele verschil aan tussen de hoeveelheid warmte en koude die in de bodem wordt geïnjecteerd gedurende een bepaalde periode. Hiervoor wordt de volgende formule gehanteerd (IF Technology, 2007):

$$\text{Balans} = \frac{E_{kou} - E_{warm}}{E_{kou} + E_{warm}} \quad (\text{vgl. 4.1})$$

Waarin:

$E_{kou}$  = hoeveelheid koude die uit de bodem wordt gehaald

$E_{warm}$  = hoeveelheid warmte die uit de bodem wordt gehaald

Bij een balans van 0% wordt exact evenveel warmte als koude in de bodem opgeslagen. Bij een positieve balans (> 0%) is sprake van een warmteoverschot in de bodem en bij een negatieve balans is sprake van een koudeoverschot in de bodem. Volgens het Lozingenbesluit Bodembescherming is een thermische onbalans niet toegestaan. Met name in de utiliteit (kantoren) en de industrie is echter sprake van een grotere koudevraag dan warmtevraag (overschot aan warmte), terwijl in de woningbouw juist vooral warmtevraag bestaat (koudeoverschot).

Als sprake is van een gesloten energiebalans, worden gelijke hoeveelheden warmte en koude in de bodem opgeslagen. In dat geval kan worden aangenomen dat op grotere afstand van een gesloten dan wel open WKO systeem geen netto beïnvloeding van het grondwater optreedt doordat de warmte en koude elkaar compenseren (door processen als menging en geleiding). In het geval van een niet-gesloten energiebalans zal het WKO systeem netto warmte of koude verliezen, met als gevolg opwarming of afkoeling buiten het directe invloedsgebied. Als verschillende WKO systemen op te korte afstand van elkaar worden geplaatst, is de kans op thermisch beïnvloeding van een nabijgelegen andere WKO daarom groter bij een energieonbalans. Na ontmanteling van een WKO systeem kan warmte of koude in de ondergrond achterblijven. Als de hoeveelheid warmte en koude ongeveer gelijk is (op het gebied van volume en afwijking van natuurlijke grondwatertemperatuur), dan zullen de temperatuurverschillen stroomafwaarts geleidelijk uitdoven door menging en geleiding (Bonte, 2010b).

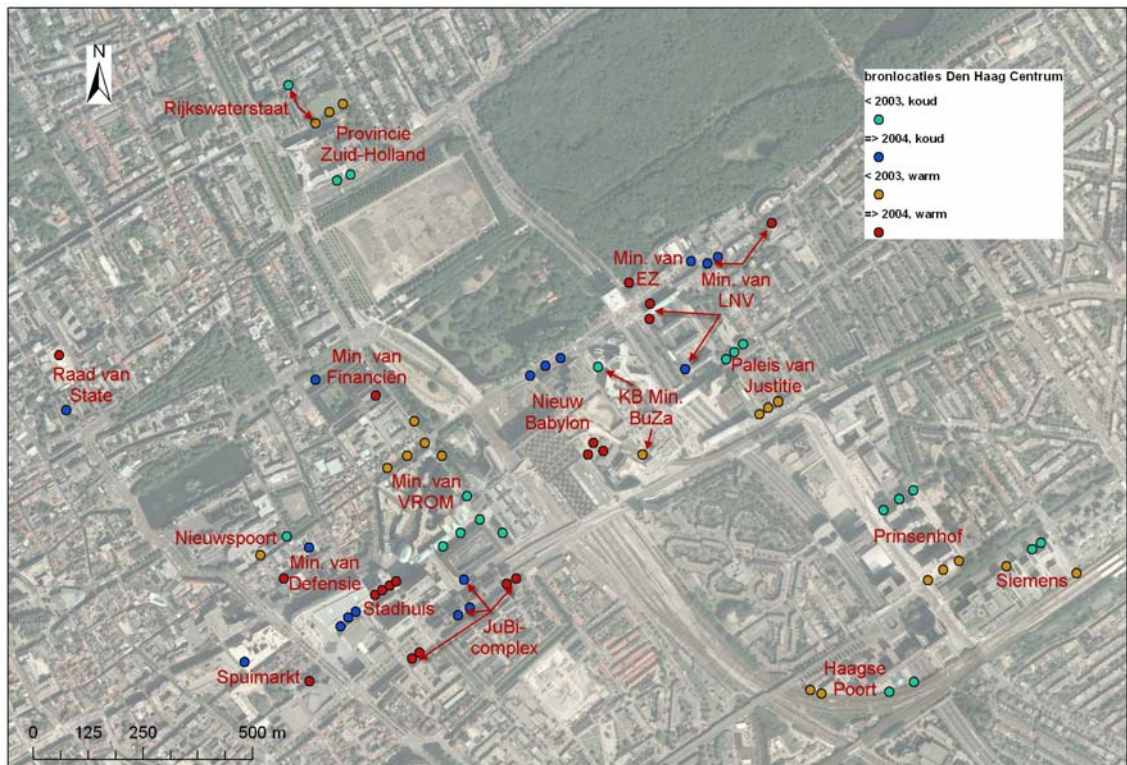
Uit onderzoek aan open systemen blijkt echter dat een gesloten energiebalans vrijwel nooit gerealiseerd wordt (IF Technology, 2007). Dit betekent dus dat er praktisch altijd netto warmte of koude in de ondergrond wordt gebracht. Afhankelijk van de mate van onbalans kan dat een overtreding van de vergunningvoorschriften voor open WKO systemen betekenen. Bij een te grote onbalans zal het rendement van het systeem zelf teruglopen. Enige mate van zelfregulering is daarom wel te verwachten (Vermaas en Van Wee, 2009).

Van belang om te noemen is dat de opwarming aan de oppervlakte niet alleen zorgt voor rechtstreekse opwarming van de ondergrond. Ook de koudevraag van de bebouwing zal hierdoor toenemen. Als geen energiebalans wordt aangehouden zou de extra koudevraag kunnen leiden tot een toename van warmteoverschotten in de ondergrond bij WKO systemen. Op basis van een analyse van 67 projecten (IF Technology, 2007) is een gemiddelde onbalans berekend van 10%, waarbij sprake is van een warmteoverschot (zie tabel 3.1). De verschillen per gebruiksdoel zijn echter groot.

Bij de industrie is sprake van een groot warmteoverschot (+65%: gemiddelde van 5 systemen), terwijl in de woningbouw sprake is van een koudeoverschot (-34%: gemiddelde van 5 systemen). In stedelijk gebied zal utiliteit (+5%: gemiddelde van 56 systemen) en woningbouw (-34%) overheersen, waardoor in veel gevallen sprake zal zijn van een koudeoverschot.

**tabel 3.1 Gegevens over energiebalans op basis van analyse 67 WKO projecten (IF Technology, 2007)**

gebruiksdoel	aantal projecten	warmtelevering (koude in de bodem) [MWh]	koudelevering (warmte in de bodem) [MWh]	energiebalans [%]
agrarisch	1	2.176	1.637	-14%
industrie	5	5.424	25.604	+65%
utiliteit	56	122.530	135.372	+5%
woningbouw	5	5.090	2.514	-34%
<b>totaal</b>	<b>67</b>	<b>135.219</b>	<b>165.127</b>	<b>+10%</b>



**figuur 3.9 Overzichtkaart met de WKO-systemen in het eerste watervoerende pakket in het centrum van Den Haag**



Om een indruk te verkrijgen van de gevolgen van een langdurige onbalans in een gebied waar zich veel WKO-systemen bevinden zijn enkele oriënterende berekeningen uitgevoerd. Doel van de berekeningen is om na te gaan in hoeverre de gemiddelde bodemtemperatuur in een gebied door WKO kan gaan oplopen. Voor de berekeningen is uitgegaan van het centrum van Den Haag, een gebied met een zeer hoge dichtheid aan WKO-systemen (zie ook MMB rapport 7 - Interferentie). In figuur 3.9 staat een kaart van het gebied dat ook in MMB-rapport 7 – Interferentie is gebruikt. In dit gebied bevinden zich 19 WKO systemen, die gezamenlijk vergunning hebben voor het verpompen van ongeveer 12 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Bij een gemiddeld temperatuurverschil van 4 °C tussen het onttrokken en het geïnfilterde water (gemiddelde op basis van onderzoek 67 projecten) kan met deze 12 miljoen m<sup>3</sup> ongeveer 56 GWh<sub>t</sub> aan koude en warmte worden geleverd. In de praktijk wordt echter minder verpompt dan is vergund. Een analyse voor het centrum van Den Haag geeft aan dat in de periode 2006 t/m 2010 gemiddeld over 9 systemen (andere systemen niet meegenomen in verband met het ontbreken van gegevens) tussen de 40 en 60% van de vergunde waterhoeveelheid is verpompt. Uitgaande van een energiebalans en het verpompen van 50% van de vergunde waterhoeveelheid wordt per seizoen 14 GWh<sub>t</sub> aan thermische energie opgeslagen.

Op basis van de gegevens uit tabel 3.1 mag de energiebalans in stedelijk gebied worden verwacht tussen -34% (100% woningbouw) en +5% (100% utiliteit). In de analyse zijn echter veel meer utiliteitsprojecten opgenomen dan woningbouwprojecten, wat een afspiegeling is van de praktijk: in de utiliteit is WKO een geaccepteerde en veel toegepaste techniek en in de woningbouw is dat (nog) niet het geval. Ook in het centrum van Den Haag gaat het vooral om WKO-systemen voor de utiliteit. Voor de berekeningen is rekening gehouden met een onbalans tussen -10% en +5%. De resultaten v.d. berekeningen zijn opgenomen in tabel 3.2.

**tabel 3.2            Inschatting van de gemiddelde opwarming/afkoeling van het eerste watervoerende pakket door WKO in het centrum van Den Haag**

Vergunde waterhoeveelheid [m <sup>3</sup> /j] (totaal 19 projecten)	12.161.800	12.161.800
Werkelijke waterverplaatsing t.o.v. vergund	50%	50%
Gemiddeld temperatuurverschil [°C]	4	4
Energiebalans	-10%	5%
Warmtetoevoeging [GWht/j]	26,8	28,9
Koudetoevoeging [GWht/j]	29,6	27,5
Verschil [GWht/j]	-2,82	1,41
Oppervlakte beschouwd gebied [km <sup>2</sup> ]	4,5	4,5
Gemiddelde dikte eerste watervoerende pakket [m]	40	40
Warmtecapaciteit watervoerende pakket [MJ/(m <sup>3</sup> °C)]	2,5	2,5
Benodigde energie om WVP 1 °C op te warmen [GWht]	125	125
Berekende verandering gemiddelde temperatuur [°C/j]	-0,023	0,011

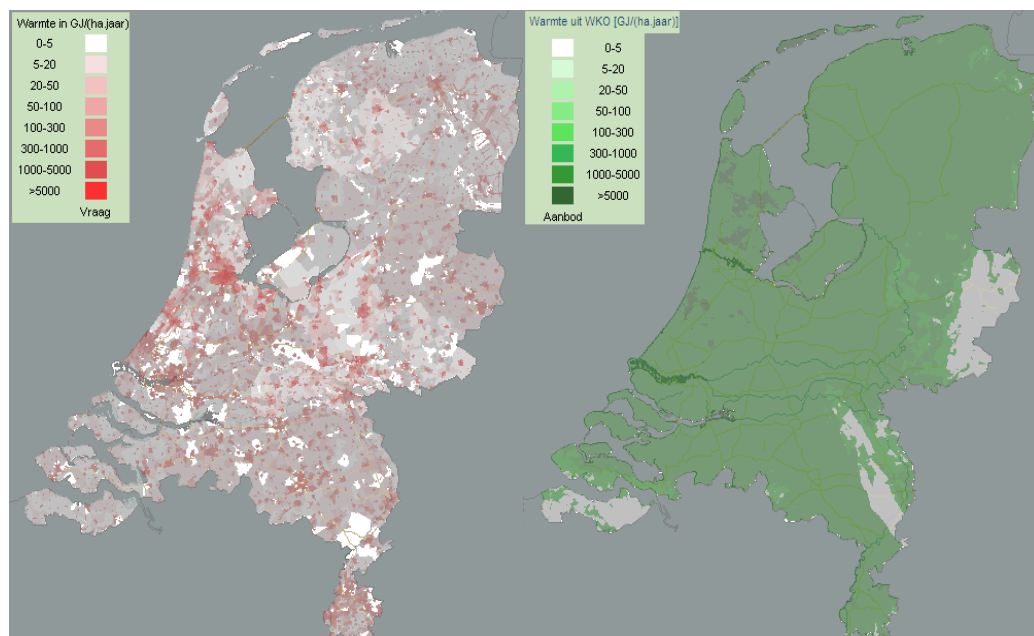
Geconcludeerd kan worden dat de te verwachten temperatuurveranderingen door WKO beperkt zijn, zolang bij benadering sprake is van een energiebalans. Opgemerkt wordt, dat door de opwarming een verschuiving kan optreden in de verhouding tussen de warmtevraag en de koudevraag (meer koelbehoefte en minder warmtevraag), waardoor de energiebalans enigszins zou kunnen verschuiven en minder afkoeling dan wel meer opwarming van de ondergrond door WKO mag worden verwacht.

Bij een 100% onbalans (b.v. al het water van alle WKO systemen verpompen voor koeling en daarmee alleen maar warmte toevoegen en geen koude) kan de temperatuurverandering oplopen tot 0,2 °C per jaar, wat op de lange termijn tot een duidelijke effecten kan leiden: in 10 jaar tijd zou dit overeen komen met een opwarming van 2 °C.

### 3.2.2 Energievraag aan de oppervlakte

Agentschap NL (Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie) heeft kaarten beschikbaar gemaakt van het warmtegebruik in Nederland en het potentieel aan warmte dat met WKO kan worden geleverd vanuit de ondergrond (figuur 3.10).

Uit figuur 3.10 kan worden afgeleid dat in veel gebieden de ruimte in de ondergrond voldoende is om de warmtevraag met WKO te kunnen te dekken. Alleen in gebieden met een zeer hoge warmtevraag en/of een beperkt potentieel van de ondergrond kan de ruimte in de ondergrond beperkend zijn. Verder is de energievraag op het platteland met 0-20 GJ/ha per jaar relatief klein en ligt deze in steden vele malen hoger, met lokaal meer dan 5000 GJ/ha per jaar. Om de verschillen duidelijk te maken is hieronder zowel voor de stad Rotterdam als voor de provincie Drenthe de warmtevraag bepaald.



**figuur 3.10** Links: Kaart met de warmtevraag per hectare (excl. Industrie). De jaarlijkse energievraag varieert van 0-20 GJ/ha op het platteland tot lokaal >5000 GJ/ha in de steden. Rechts: Potentiele hoeveelheid warmte die in Nederland kan worden geleverd met WKO. Dit potentiele aanbod varieert van 0-500 GJ/ha per jaar in het oosten tot 5000 GJ/ha per jaar in het westen van het land. (Bron: <http://agentschapnl.kaartenbalie.nl>). Alleen de warmtevraag is bekend, over de koudevraag zijn geen gegevens beschikbaar

## Rotterdam

Het CBS (Centraal Bureau voor de Statistiek) heeft de gegevens van het aardgasverbruik van heel Rotterdam in 2004 in kaart gebracht. Het aardgasverbruik is in verschillende categorieën bepaald: per gezinssamenstelling (1- of meer-persoons), woningtype, bouwperiode van de woning en per deelgemeente. In tabel 3.3 is het gemiddelde en totale energieverbruik in 2004 weergegeven met een indeling naar bouwperiode.

**tabel 3.3 Aardgasverbruik woningen in 2004 in Rotterdam, per bouwperiode (www.cbs.nl)**

2004	Aardgasverbruik			Excl. Stadsverwarming		
	Gemiddeld[m <sup>3</sup> ]	Aantal	Totaal[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	Gemiddeld [m <sup>3</sup> ]	Aantal	Totaal [10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]
voor 1925	1578	31787	50,16	1600	31346	50,15
1925-1945	1536	30470	46,80	1559	30024	46,81
1946-1965	1329	55889	74,28	1368	54263	74,23
1966-1975	1376	20674	28,45	1447	19652	28,44
1976-1980	1026	15738	16,15	1400	11514	16,12
1981-1985	756	24730	18,70	1269	14730	18,70
1986-1990	965	18196	17,56	1200	14624	17,55
1991-1995	1140	14562	16,60	1318	12597	16,60
1996-1999	865	9086	7,86	1183	6644	7,86
2000 en later	603	5799	3,50	1031	3391	3,50
Totaal	1117,4	226931	280,04	1337,5	198785	279,95

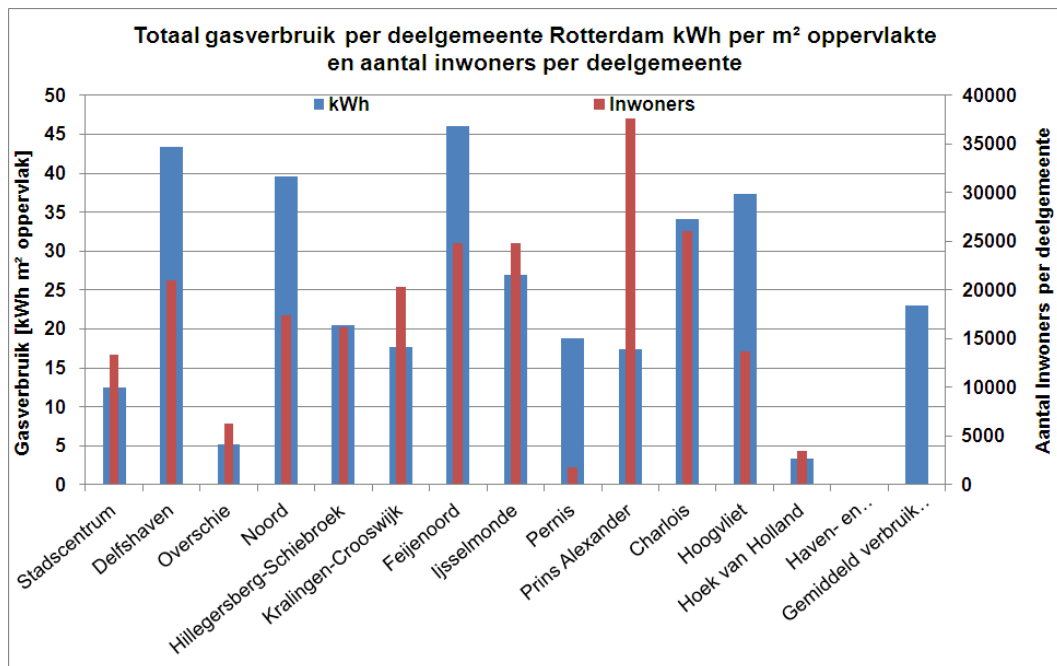
De bouwperiode blijkt een belangrijke verklarende factor, maar niet de enige. Wellicht spelen ook verschillen in woningtypen die in de verschillende periodes gebouwd zijn een rol of renovaties. Het laagste gasverbruik vinden we in de woningen van de laatste jaren; het hoogste in de vooroorlogse woningen. Het gasverbruik per woningtype (appartement, tussenwoning, hoekwoning, vrijstaand) verschilt in zeer sterke mate. In vrijstaande woningen wordt gemiddeld drie keer zo veel aardgas verbruikt als in appartementen (www.cbs.nl). Aan de hand van de energievraag per deelgemeente in Rotterdam (2004) en de oppervlakte van elke deelgemeente kan berekend worden hoe groot de warmtevraag in een woonwijk is per m<sup>2</sup> grondoppervlak van de wijk. In onderstaande tabel 3.4 is het aardgasverbruik per deelgemeente in Rotterdam in 2004 weergegeven en omgerekend naar joules en kWh per m<sup>2</sup>.

In tabel 3.4 en figuur 3.11 is het gemiddelde energieverbruik per Rotterdamse woning in 2004 weergegeven per deelgemeente. Het gemiddelde aardgasverbruik in het Stadscentrum is zeer laag: iets meer dan een derde van het stedelijk gemiddelde. Hier blijkt duidelijk de invloed van de stadsverwarming; het nulverbruik in dergelijke woningen zorgt in delen van het stadscentrum voor een heel laag gemiddeld aardgasverbruik. Echter, ook als daarmee rekening wordt gehouden, is het verbruik in het Stadscentrum nog steeds relatief laag. In de wijk Prins Alexander is het gemiddelde aardgasverbruik eveneens laag als gevolg van het aandeel stadsverwarming.

**tabel 3.4 Energieverbruik per deelgemeente in Rotterdam, 2004. (Bron: www.CBS.nl)**

2004 Deelgemeente Rotterdam	Oppervlak [km <sup>2</sup> ]	Inwoners	Totaal aardgasverbruik [10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	Gemiddeld aardgasverbruik per deelgemeente per m <sup>2</sup> oppervlakte		
				[m <sup>3</sup> per m <sup>2</sup> oppervlak]	Mega Joule	kWh
Stadscentrum	5	31363	6,37	1,27	44,77	12,44
Delfshaven	5,8	70290	25,79	4,45	156	43,43
Overschie	17,3	15769	9,18	0,53	18,67	5,19
Noord	5,37	48990	21,76	4,05	143	39,59
Hillegersberg-Schiebroek	13,26	40850	27,83	2,09	73,80	20,50
Kralingen-Crooswijk	12,9	52000	23,36	1,81	63,69	17,69
Feijenoord	6,44	72300	30,37	4,72	166	46,07
IJsselmonde	13,12	60870	36,26	2,76	97,19	26,99
Pernis	1,6	4560	3,07	1,92	67,46	18,74
Prins Alexander	20,24	89225	36,06	1,78	62,65	17,41
Charlois	10	66000	34,89	3,49	123	34,09
Hoogvliet	5	36600	19,14	3,83	135	37,40
Hoek van Holland	17,47	9300	5,88	0,34	11,84	3,29
Haven- en Industriegebied	100	0	0,073	0,0007	0,026	0,007
Gem.verbruik Rotterdam	16,68	42722,6	20,00	2,36	83,01	23,05

Net als in de andere grote Nederlandse steden is het energieverbruik per huishouden in Rotterdam een stuk lager dan in de rest van het land: in Rotterdam is het gemiddelde aardgasverbruik ongeveer tweederde van het landelijk gemiddelde, en het gemiddelde elektriciteitsverbruik ongeveer viervijfde van het landelijk gemiddelde. Behalve het grotere aandeel stadsverwarming zal daarbij ook het relatief grote aandeel flats en appartementen (isolerende werking van de burens) een rol spelen. Ook de gemiddeld veel kleinere huishoudens- en woninggrootte kunnen een deel van de verklaring vormen, evenals de slechtere inkomenspositie van Rotterdamse huishoudens en de isolerende rol die de compacte bouw van een grote stad speelt (het UHI-effect) ([www.cos.rotterdam.nl](http://www.cos.rotterdam.nl)).



**figuur 3.11 Totaal en gemiddeld gasverbruik in kWh per m<sup>2</sup> Rotterdam ([www.cbs.nl](http://www.cbs.nl))**

## Drenthe

In Drenthe is het gemiddelde jaarlijkse aardgasverbruik 2.200 m<sup>3</sup> per woning ([www.cbs.nl](http://www.cbs.nl)). Er zijn 200.000 woningen in Drenthe verspreid over een oppervlak van 2.680 km<sup>2</sup>. Wanneer dit omgerekend wordt naar verbruik per vierkante meter, dan volgt hieruit een gemiddelde energievraag van 1,6 kWh/m<sup>2</sup>.

### 3.2.3 Vergelijking energievraag met autonome opwarming ondergrond

De opwarming van de bodem vertegenwoordigt een zekere hoeveelheid energie per m<sup>2</sup> per jaar. Deze kan worden afgezet tegen de energievraag voor verwarming aan de oppervlakte. Hierbij is van belang dat de gemiddelde oppervlaktetemperatuur in de stad hoger is dan op het platteland, wat ook van invloed is op de mate waarin de ondergrond opwarmt.

Voor de stad Rotterdam geldt zowel de opwarming door klimaatverandering als de opwarming door het UHI-effect. Op basis van de berekende temperatuurveranderingen (zie figuur 3.1 en figuur 3.2) is de energiehoeveelheid bepaald die sinds 1900 aan de bodem is toegevoegd: deze bedraagt 61 kWh/m<sup>2</sup> bij een UHI-effect van 1 °C en 118 kWh/m<sup>2</sup> bij een UHI-effect van 3 °C. Voor 2040 is eenzelfde berekening gedaan, waaruit 109 kWh/m<sup>2</sup> volgt bij een UHI-effect van 1 °C (deze 1 °C geldt voor 2010; in 2040 is dit toegenomen tot 1,3 °C) en 190 kWh/m<sup>2</sup> bij een UHI-effect van 3 °C (deze 3 °C geldt voor 2010; in 2040 is dit toegenomen tot 3,8 °C). Hieruit volgt dat tussen 2010 en 2040 respectievelijk 48 en 72 kWh/m<sup>2</sup> aan de bodem is toegevoegd, wat overeen komt met 1,6 of 2,4 kWh/m<sup>2</sup> per jaar. Uit de berekeningen blijkt verder dat de totaal aan de ondergrond toegevoegde hoeveelheid warmte als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking de komende 30 jaar bijna verdubbelt.

Bij de gemiddelde jaarlijkse warmtevraag van 23 kWh/m<sup>2</sup> (= 828 GJ/ha) van Rotterdam, komt de opwarming overeen met 7 of 10 % van de warmtevraag aan de oppervlakte. Het installeren van WKO-systemen voor alle gebouwen met een netto warmteonttrekking ter grootte van 7 tot 10 % van de totale warmtevraag zou de autonome opwarming kunnen compenseren. De WKO-systemen dienen dan wel in de eerste 50-100 m van de ondergrond te worden aangebracht aangezien de autonome opwarming van de ondergrond daar optreedt. Een stap verder zou zijn om ook de opwarming die is opgetreden tot 2010 in 30 jaar te compenseren. In dat geval zou een netto warmteonttrekking ter grootte van 16 tot 28 % van de totale warmtevraag mogelijk zijn.

Opgemerkt wordt dat het warmtegebruik per woonwijk verschilt. In de wijk Feijenoord is het warmtegebruik 2 keer zo groot als het gemiddelde (46 kWh/m<sup>2</sup> per jaar) en is de opwarming van de bodem naar verhouding kleiner. In wijken met een relatief laag warmtegebruik is de opwarming van de bodem naar verhouding juist groter.

In de provincie Drenthe is de opwarming van de ondergrond vrijwel alleen het gevolg van klimaatverandering (in de stedelijke gebieden kan de opwarming wat groter zijn). Om de hoeveelheid energie te berekenen die de bodem in gaat in Drenthe, is daarom dezelfde berekening gebruikt die voor Rotterdam is gedaan, maar zonder het UHI-effect (figuur 3.1 en figuur 3.2); +2,9 °C in de periode 1900-2040). Het verschil tussen de huidige hoeveelheid energie die de bodem in gaat en de energie die de komende 30 jaar de bodem in gaat is weergegeven in tabel 3.5.

Voor Drenthe is de gemiddelde hoeveelheid energie die tussen 2010 en 2040 de bodem in gaat door autonome opwarming gelijk aan 1,2 kWh/m<sup>2</sup> per jaar (= 43 GJ/ha per jaar), wat overeen komt met 73% van de totale warmtevraag. Hierbij moet worden opgemerkt dat het niet mogelijk zal zijn om deze 73% te benutten en tegelijkertijd de bodemtemperatuur boven de oorspronkelijke waarde te houden. De reden is dat de opwarming door het klimaat diffuus plaatsvindt over de gehele provincie, terwijl de warmtevraag plaatselijk is (daar waar bebouwing staat). Voor de stedelijke gebieden in Drenthe (zoals Hoogeveen, Emmen, Meppel en Assen) zal iets vergelijkbaars gelden als voor Rotterdam: de warmtevraag is hier aanmerkelijk groter dan de autonome opwarming. In het landelijk gebied daarentegen (lage bebouwingsdichtheid) is de warmtevraag kleiner dan de autonome opwarming. In tabel 3.5 zijn de resultaten voor zowel Rotterdam als Drenthe samengevat.

Als wordt gekozen voor het toestaan van een energieonbalans om daarmee de autonome opwarming van de ondergrond te compenseren, dan kan (uitgaande van toepassing overeen van WKO in alle gebouwen) in principe een energetische onbalans van 10 à 20 % worden toegestaan in de ondiepe bodem in de stad. Op het platteland is de absolute opwarming weliswaar kleiner, maar is de afname van het gemiddelde energieverbruik per m<sup>2</sup> sterker. Dezelfde maatregel zou daarom op het platteland leiden tot een veel grotere speelruimte in de energiebalans (voor Drenthe 73%).

Op deze manier kan ook op basis van de gegevens van het Agentschap NL (figuur 3.10) voor verschillende leefomgevingen de mate van energetische onbalans worden bepaald (tabel 3.6). De opwarming van de bodem voor verschillende UHI-effecten is weergegeven in tabel 3.7.

**tabel 3.5 Energie Rotterdam en Drenthe tot 2010 en 2040 ([www.cbs.nl](http://www.cbs.nl))**

<b>Rotterdam</b>	Klimaat + UHI 1 °C	Klimaat + UHI 3 °C
1) Opwarming ondergrond Rotterdam 1900-2010	61 kWh/m <sup>2</sup>	118 kWh/m <sup>2</sup>
2) Opwarming ondergrond Rotterdam 1900-2040	109 kWh/m <sup>2</sup>	190 kWh/m <sup>2</sup>
3) Opwarming ondergrond Rotterdam 2010-2040 (verschil 1 en 2)	47 kWh/m <sup>2</sup> = 1,6 kWh/m <sup>2</sup> per jaar = circa 7 % van het jaarlijks energieverbruik in Rotterdam	72 kWh/m <sup>2</sup> = 2,4 kWh/jr = circa 10 % van het jaarlijks energieverbruik in Rotterdam
<b>Drenthe</b>	Alleen klimaatverandering	
4) Opwarming ondergrond Drenthe 1900-2010	33 kWh/m <sup>2</sup>	
5) Opwarming ondergrond Drenthe 1900-2040	68 kWh/m <sup>2</sup>	
6) Opwarming ondergrond Drenthe 2010-2040 (verschil 1 en 2)	35 kWh/m <sup>2</sup> = 1,2 kWh/m <sup>2</sup> per jaar = circa 73% van het jaarlijkse energieverbruik in Drenthe	

**tabel 3.6** Berekenende hoeveelheid energie die de bodem inziigt als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking.

Opwarming (klimaat+UHI)	1900-2010 kWh/m <sup>2</sup>	2010-2040 kWh/m <sup>2</sup>	1900-2040 kWh/m <sup>2</sup>	1900-2010 kWh/m <sup>2</sup> /jr	2010-2040 kWh/m <sup>2</sup> /jr	1900-2040 kWh/m <sup>2</sup> /jr
Klimaat	33	35	68	0,3	1,2	0,5
Klimaat +1 °C	61	47	108	0,6	1,6	0,8
Klimaat +2 °C	89,5	59,5	149	0,8	2,0	1,1
Klimaat + 3 °C	118	72	190	1,1	2,4	1,4

**tabel 3.7** Verhouding tussen de hoeveelheid warmte die jaarlijks aan de bodem wordt toegevoegd door opwarming en de warmtevraag aan de oppervlakte voor verschillende leefomgevingen tot 2040. Voor elke locatie is een temperatuurstijging door het UHI-effect en klimaatverandering weergegeven. Ook is de maximale diepte gegeven tot waar de bodemtemperatuur  $\geq 0,5$  °C is toegenomen door klimaatverandering en/of verstedelijking.

Locatie en energievraag in kWh/m <sup>2</sup> /jr	UHI	Klimaat	Autonome opwarming als percentage van de energievraag	Diepte (tot > 0,5 °C opwarming)
<i>1900-2010</i>				
Buitengebied (0,1-3)	0 °C	1,7 °C	10-100 %	< 35 m-mv
Dorp (3-14)	0-1 °C	1,7 °C	4-10 %	< 55 m-mv
Stad (10-43)	1-3 °C	1,7 °C	3-6 %	< 60-85 m-mv
Stad, groot (21-157)	2-3 °C	1,7 °C	1-4 %	< 70-85 m-mv
<i>2010-2040</i>				
Buitengebied (0,1-3)	0 °C	1,2 °C	40-100 %	
Dorp (3-14)	0-1 °C	1,2 °C	10-40 %	
Stad (10-43)	1-3 °C	1,2 °C	6-16 %	
Stad, groot (21-157)	2-3 °C	1,2 °C	2-9 %	
<i>1900-2040</i>				
Buitengebied (0,1-3)	0 °C	2,9 °C	20-100 %	< 60 m-mv
Dorp (3-14)	0-1 °C	2,9 °C	5-20 %	< 80 m-mv
Stad (10-43)	1-3 °C	2,9 °C	3-10 %	< 80-105 m-mv
Stad, groot (21-157)	2-3 °C	2,9 °C	1-5 %	< 90-105 m-mv

## 4 Evaluatie resultaten

*Ananda Floris en Benno Drijver*

### 4.1 Discussie

Het uitgevoerde onderzoek toont aan dat sprake is van opwarming aan de oppervlakte als gevolg van klimaatverandering en verstedelijking. Deze opwarming heeft tot gevolg dat ook de temperatuur in de ondergrond toeneemt, wat onder meer wordt bevestigd door bodemtemperatuurmetingen die zijn uitgevoerd door Kooi (2008): de temperatuur in het bovenste deel van de ondergrond is in recente metingen bij vrijwel alle meetputten duidelijk hoger dan temperatuur die in de jaren '70 in dezelfde meetputten is gemeten. In dit onderzoek is deze opwarming gekwantificeerd, waarbij onderscheid is gemaakt tussen de effecten als gevolg van klimaatverandering en de effecten als gevolg van verstedelijking.

#### **Invloed opwarming op WKO-systemen**

Uit de berekeningen volgt dat de autonome opwarming van de ondergrond sterk afhankelijk is van de diepte. De autonome opwarming van de ondergrond is geconcentreerd in de bovenste 50 à 100 meter van de ondergrond en zal pas op zeer lange termijn (honderden tot duizenden jaren) op grotere diepten merkbaar zijn. Nagenoeg alle gesloten WKO-systemen bevinden zich volledig in de bovenste 100 meter en ondervinden daardoor de meeste invloed van de autonome opwarming. Aangezien een groot deel van de gesloten systemen hoofdzakelijk wordt gebruikt voor verwarming, is de opwarming voor een groot deel van de gesloten systemen gunstig voor het functioneren: deze systemen kunnen nuttig gebruik maken van de warmte die als gevolg van de autonome opwarming aan de ondergrond wordt toegevoegd.

Open WKO-systemen zijn afhankelijk van de aanwezigheid van watervoerende pakketten die geschikt zijn voor gebruik (er mag bijvoorbeeld geen redoxgrens aanwezig zijn in verband met de daaraan gekoppelde putverstopingsrisico's) en waarin WKO is toegestaan. Vrijwel alle open WKO-systemen worden dieper dan 20 m gerealiseerd. Gebieden waar veel WKO-systemen in de bovenste 50 à 100 m worden gemaakt zijn Noord-Brabant (alle systemen ondieper dan 80 m-mv), Utrecht (gebruik tweede en derde watervoerende pakket vaak niet toegestaan), Drenthe, Limburg, Overijssel en Zeeland (relatief ondiepe ligging geohydrologische basis). Ook in de provincie Zuid-Holland zijn in het verleden veel relatief ondiepe systemen gerealiseerd. De uitgevoerde berekeningen geven aan dat de autonome opwarming die mag worden verwacht in stedelijk gebied in de periode 2010-2040 0,03 à 0,05 °C per jaar bedraagt op 20 m-mv en 0,005 à 0,01 °C per jaar op 100 m-mv (zie figuur 3.8).



De totale opwarming over de periode 2010-2040 komt dan uit op 0,9 à 1,5 °C op 20 m diepte en 0,15 à 0,3 °C op 100 m-mv. Hoewel een temperatuurstijging van meer dan 1 °C aanzienlijk is, heeft deze stijging geen noemenswaardige gevolgen voor de toepasbaarheid of het functioneren van WKO-systemen. Andere factoren hebben namelijk een veel grotere invloed op de temperatuur van het onttrokken water, waarbij het gaat om factoren zoals de temperatuur van de opgeslagen warmte dan wel koude, de mate van water- en energie(on)balans, de snelheid van de grondwaterstroming, de hoeveelheid warmte of koude die wordt opgeslagen en het aantal jaren dat het systeem in bedrijf is. De aanwezigheid van WKO-systemen in watervoerende pakketten met sterk uiteenlopende natuurlijke temperaturen (in Nederland globaal tussen 9 en 14 °C) bevestigt dat de toepasbaarheid van WKO bij enige opwarming niet wordt beïnvloed. In veel gevallen is de te verwachten bodemtemperatuur vooraf zelfs niet nauwkeurig bekend.

Recirculatiesystemen kunnen overigens wel degelijk gevoelig zijn voor veranderingen van de natuurlijke grondwatertemperatuur. Opwarming maakt het opgepompte water bij deze systemen minder geschikt voor koelingsdoeleinden: voor het leveren van hetzelfde koelvermogen zal door de hogere temperatuur veelal een hoger debiet nodig zijn.

Bij WKO-systemen die zich in dieper gelegen watervoerende pakketten bevinden (met name in Flevoland, Friesland, Gelderland, Groningen en Noord- en Zuid-Holland) speelt de autonome opwarming geen rol van betekenis.

#### **Verhouding tussen effecten WKO en autonome opwarming**

Voor het centrum van Den Haag, één van de gebieden met de hoogste dichtheid aan WKO-systemen, is berekend dat de netto opwarming door de (open) WKO-systemen in het eerste watervoerende pakket (globaal tussen 20 en 60 m diepte) gemiddeld over het beschouwde gebied, afhankelijk van de mate van energiebalans, ligt tussen -0,02 °C per jaar (afkoeling) en +0,01 °C per jaar (opwarming). Op dezelfde diepte is door autonome opwarming sprake van een temperatuurstijging met ongeveer 0,03 °C per jaar (klimaatverandering + UHI = 2 °C op 40 m diepte). In dit geval is de invloed van de autonome opwarming dus groter dan de invloed van een hoge dichtheid aan WKO-systemen. Beide effecten zijn overigens relatief klein: enkele tienden van graden in 10 jaar tijd. Op een grotere diepte neemt de invloed van de autonome opwarming af en zal de invloed van WKO vaak groter zijn.

Wel moet worden opgemerkt dat de invloed van WKO op lokale schaal (in de warme en koude bellen) veel groter is dan het effect van de autonome opwarming.

#### **Invloed op de grondwaterkwaliteit**

De door autonome opwarming veroorzaakte toename van de temperatuur in de ondergrond zou gevolgen kunnen hebben voor de chemische en microbiologische samenstelling van het grondwater. De invloed van de temperatuur op de grondwaterkwaliteit is binnen Meer Met Bodemenergie onderzocht in het kader van de literatuurstudie (MMB-rapport 2 - Literatuuronderzoek) en het onderzoek bij de praktijkpilots (MMB-rapport 3+4 - Effecten op de ondergrond).

Daarnaast wordt momenteel ook buiten MMB-onderzoek gedaan naar de invloed van WKO op de grondwaterkwaliteit in het nog lopende promotieonderzoek van Bonte (zie Bonte, et al. 2010a, 2011a, 2011b, 2011c). Het uitgevoerde onderzoek geeft aan dat een temperatuurverandering van enkele °C geen noemenswaardige invloed heeft op de chemische en microbiologische samenstelling van het grondwater.

### **Nuttig inzetten opgebouwde warmtevoorraad**

Opwarming of afkoeling van een bodempakket van bijvoorbeeld 50 of 100 m dikte met enkele °C over een groot gebied vertegenwoordigt een zeer grote hoeveelheid energie. De opwarming van de ondergrond kan worden gezien als grootschalige opslag van warmte (zie bv. Nordell, 2005). Bij geothermische projecten op zeer grote diepte (enkele kilometers) is het vanzelfsprekend deze energie te winnen en te benutten. Bij de relatief ondiepe WKO-systemen is dat niet het geval.

Verschillende onderzoekers wijzen op de mogelijkheid om de warmte die mede door het UHI-effect in de stedelijke ondergrond is opgeslagen in te zetten voor de verwarming van woningen in de stad (Allen et al., 2003; Yalcin en Yetement, 2009; Zhu et al., 2010). Zhu (2010) geeft bijvoorbeeld aan dat de hoeveelheid energie die beschikbaar komt bij het verlagen van de temperatuur met 2 °C van de ondiepe aquifer onder Keulen minimaal gelijk is aan 2,5 keer de jaarlijkse warmtebehoefte voor ruimteverwarming in de stad. In het minimale scenario is uitgegaan van minimale waarden voor het inschatten van de warmtevoorraad. Zo is bijvoorbeeld de minimale waarde aangehouden voor dikte van de aquifer (10 m), terwijl een gemiddelde dikte van 20 m verwacht wordt. Dit betekent dat in werkelijkheid waarschijnlijk meer dan 5 keer de jaarlijkse warmtebehoefte beschikbaar is.

Vergelijkbare berekeningen kunnen voor de Nederlandse situatie worden uitgevoerd. Als voor heel Nederland alleen het effect van klimaatverandering wordt beschouwd, dan is de totale hoeveelheid opgeslagen warmte over de periode 1900-2010 in de Nederlandse ondergrond gelijk aan  $(33 \text{ kWh/m}^2 * 33.883 * 10^6 \text{ m}^2 \text{ landoppervlak}) = 1,12 * 10^{12} \text{ kWh}$ . In de periode 2010-2040 komt daar nog eens  $1,18 * 10^{12} \text{ kWh}$  bij. Het totale warmtegebruik van alle huishoudens in heel Nederland in 2006 was volgens het ECN (2010) 280 PJ (=  $7,8 * 10^{10} \text{ kWh}$ ), dat van de utiliteitsbouw 206 PJ (=  $5,7 * 10^{10} \text{ kWh}$ ) en van de landbouw was dat 90 PJ (=  $2,5 * 10^{10} \text{ kWh}$ ). Het totale warmtegebruik van de huishoudens, utiliteitsbouw en de landbouw ( $16 * 10^{10} \text{ kWh}$  per jaar) kan met de huidige warmtevoorraad 7 jaar lang volledig worden gedekt. Over de periode 2010-2040 komt daar nog eens een warmtevoorraad voor ruim 7 jaar bij.

Doordat de warmtevraag ruimtelijk gezien niet evenredig verdeeld is, zal de warmtevoorraad in gebieden met een hoge warmtevraag sneller zijn uitgeput dan in gebieden met een lage warmtevraag. Voor het grootste deel van de stadswijken ligt de energievraag tussen 1.000 en 2.000 GJ/ha per jaar (bron: Agentschap NL, <http://agentschapnl.kaartenbalie.nl>), wat overeen komt met 28 tot 56 kWh/m<sup>2</sup> per jaar (gemiddeld 42 kWh/m<sup>2</sup> per jaar). De warmtevoorraad die is opgebouwd in de periode 1900-2010 is gelijk aan 60 kWh/m<sup>2</sup> per jaar bij een UHI-effect van 1 °C tot 120 kWh/m<sup>2</sup> per jaar bij een UHI-effect van 3 °C. In de stad is de warmtevoorraad dus gelijk aan 1,5 à 3 maal het jaarlijkse warmtegebruik, wat qua orde grootte overeen komt met de getallen uit Keulen.

Opvallend is wel dat de energievraag die volgt uit de warmtekaart een factor 5 à 10 groter is dan de warmtevraag voor ruimteverwarming van Keulen (volgens Zhu et al 190 GJ/ha per jaar ofwel 5,3 kWh/m<sup>2</sup> per jaar). Waarschijnlijk is dat het gevolg van de bevolkingsdichtheid die in stadswijken aanzienlijk hoger kan liggen dan voor de gehele stad. De gemeente met de hoogste bevolkingsdichtheid van Nederland is Den Haag met 12.310 inwoners per km<sup>2</sup>, wat bijna 5 keer zo hoog is als de bevolkingsdichtheid van Keulen (2.528 inw/km<sup>2</sup>). Verder gaat Zhu uit van de warmtevraag voor ruimteverwarming en de warmtekaart van het totaal (inclusief tapwater en koken, wat globaal 30% van het totaal is). Na correctie van de getallen van Keulen naar de bevolkingsdichtheid van Den Haag en toevoegen van tapwater en koken is de warmtevraag van Keulen ( $5,3 * (12.310 / 2.528) / 70\% =$ ) 37 kWh/m<sup>2</sup> per jaar en valt deze binnen de bandbreedte uit de warmtekaart. Eenzelfde berekening voor de getallen van Zhu et al voor Londen geeft een warmtevraag van 97 kWh/m<sup>2</sup> per jaar. Vergelijken met de waarden uit de warmtekaart voor Den Haag (globaal 1.500-4.000 GJ/ha per jaar ofwel 42-111 kWh/m<sup>2</sup> per jaar) komen deze getallen qua orde grootte overeen.

Als alleen de warmtevraag voor ruimteverwarming wordt gerekend (70% van 28-56 = 19-39 kWh/m<sup>2</sup> per jaar), is de warmtevoorraad langer inzetbaar.

#### **Duurzaamheid/Levensduur warmtewinning uit de ondergrond**

In de komende 30 jaar is in stedelijk gebied naar verwachting sprake van een gemiddelde jaarlijkse toevoeging van ongeveer 2 kWh/m<sup>2</sup> aan warmte aan de ondergrond. Dit komt overeen met ongeveer 5% van de warmtevraag aan de oppervlakte. Als de volledige warmtevraag vanuit de ondergrond geleverd wordt en er geen sprake is van koudevraag die vanuit de ondergrond kan worden geleverd, dan zal de ondergrond dus snel afkoelen en is geen sprake van een duurzaam systeem. In de praktijk zal naast warmtevraag echter altijd sprake zijn van een zekere koudevraag en kan de daarbij vrijkomende warmte worden opgeslagen. In de utiliteitsbouw is de koudevraag over het algemeen duidelijk groter dan de warmtevraag, terwijl in de woningbouw het omgekeerde het geval is. De totale huishoudelijke warmtevraag is qua orde grootte gelijk is aan de warmtevraag in de utiliteitsbouw, waarbij de huishoudelijke warmtevraag wat groter is (ECN, 2010). De totale warmtevraag en koudevraag van de woningen en de utiliteit samen liggen daarom naar verwachting ook in dezelfde orde van grootte. Afhankelijk van de netto warmtevraag op gebiedsniveau kan daardoor in de praktijk een veel groter deel van de netto warmtevraag worden gedekt vanuit de autonome opwarming van de ondergrond.

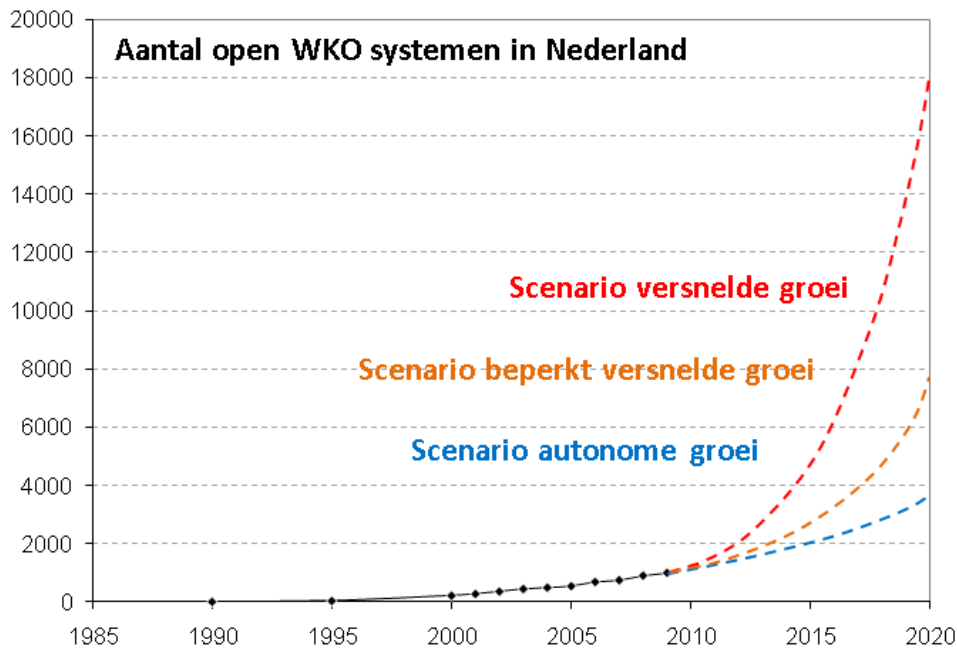
Ook het aandeel van de bebouwing dat gebruik maakt van bodemenergie bepaalt hoe lang het duurt voordat de warmtevoorraad is uitgeput. Volgens gegevens van het CBS over 2009 (CBS, 2010) bedroeg de nuttige warmteproductie met ondiepe bodemenergie in 2009 2,0 PJ (inclusief warmtepompen). Dit komt overeen met ongeveer 0,4% van de gezamenlijke warmtevraag van de huishoudens, utiliteitsbouw en de landbouw. De gemiddelde toepassingsgraad van WKO in stedelijk gebied in 2009 zal dus ook ongeveer 0,4% bedragen. De jaarlijkse autonome opwarming van de ondergrond in stedelijk gebied was in 2009 dus ongeveer 12,5 keer zo groot als de warmtelevering met WKO. Pas bij een toename van de toepassingsgraad van WKO met een factor 12,5 (ten opzichte van 2009) komt de warmtelevering door WKO overeen met de autonome opwarming.

In tabel 4.1 is een overzicht opgenomen van de berekeningsresultaten voor een aantal scenario's, waarin de levensduur van de warmtevoorraad is berekend voor verschillende dichtheden aan WKO-systemen in Nederland. Uitgangspunt van de berekeningen is dat de gemiddelde warmtelevering per systeem gelijk blijft ten opzichte van 2009, zodat de warmtelevering lineair afhankelijk is van het aantal open WKO-systemen. Verder wordt alleen warmte onttrokken en geen warmte opgeslagen (100% onbalans).

**tabel 4.1 Levensduur van de opgebouwde warmtevoorraad bij 1.000, 10.000 en 50.000 open WKO-systemen in Nederland voor verschillende sterktes van het UHI-effect (warmtevoorraad, -vraag en opwarming in kWh/m<sup>2</sup> per jaar en levensduur in jaren)**

<b>Sterkte van het UHI-effect in 2010*</b>	<b>1 °C</b>	<b>1 °C</b>	<b>2 °C</b>	<b>2 °C</b>	<b>3 °C</b>	<b>3 °C</b>
<b>Warmtevoorraad opgebouwd in periode 1900-2010</b>	61	61	90	90	118	118
<b>Jaarlijkse opwarming in de toekomst (o.b.v. 2010-2040)</b>	1,6	1,6	2	2	2,4	2,4
<b>Warmtevraag aan de oppervlakte</b>	27,8	55,6	27,8	55,6	27,8	55,6
<b>Situatie 2009: ca. 1.000 open WKO systemen</b>						
<b>Aandeel warmtevraag gedekt via WKO</b>	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
<b>Warmtevraag WKO aan de ondergrond</b>	0,11	0,22	0,11	0,22	0,11	0,22
<b>Levensduur warmtevoorraad (100% onbalans)</b>	549	275	806	403	1062	531
<b>Levensduur incl. jaarlijkse opwarming (100% onbalans)</b>	oneindig	oneindig	oneindig	oneindig	oneindig	oneindig
<b>Toekomstige situatie met 10.000 open WKO systemen</b>						
<b>Aandeel warmtevraag gedekt via WKO</b>	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%
<b>Warmtevraag WKO aan de ondergrond</b>	1,1	2,2	1,1	2,2	1,1	2,2
<b>Levensduur warmtevoorraad (100% onbalans)</b>	55	27	81	40	106	53
<b>Levensduur incl. jaarlijkse opwarming (100% onbalans)</b>	oneindig	98	oneindig	403	oneindig	oneindig
<b>Toekomstige situatie met 50.000 open WKO systemen</b>						
<b>Aandeel warmtevraag gedekt via WKO</b>	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%
<b>Warmtevraag WKO aan de ondergrond</b>	5,6	11,1	5,6	11,1	5,6	11,1
<b>Levensduur warmtevoorraad (100% onbalans)</b>	11,0	5,5	16,1	8,1	21,2	10,6
<b>Levensduur incl. jaarlijkse opwarming (100% onbalans)</b>	15,4	6,4	25,2	9,8	37,4	13,5

\* Op basis van het uitgevoerde onderzoek kan globaal worden gesteld, dat een UHI-effect van 3 °C hoort bij het centrum van een grote stad, een UHI-effect van 2 °C bij het centrum van een middelgrote stad en een UHI-effect van 1 °C bij een kleine stad of een buitenwijk van een grotere stad.



**figuur 4.1** Groei aantal vergunde open WKO-systemen tot 2009 (zwarte lijn) en de toekomstige groei volgens de drie groeiscenario's van de Taskforce WKO (2009)

Uit tabel 4.1 kan worden geconcludeerd dat zowel in de huidige situatie als bij een groei van WKO met een factor 10 de jaarlijkse opwarming in de meeste scenario's groter is dan de warmteonttrekking. Ter vergelijking: de groeiscenario's zoals geschetst door de Taskforce WKO (2009) gaan uit van een groei naar minimaal 3.500 (autonoom) tot maximaal 18.000 open WKO-systemen (versneld) in 2020. Aangezien de meeste WKO-systemen in de praktijk niet alleen warmte onttrekken maar ook opslaan, kan worden geconcludeerd dat de komende decennia de opwarming van de ondergrond op stadsniveau groter zal zijn dan de netto warmteonttrekking door WKO. Bovendien mag worden verwacht dat de warmtevraag door de hogere temperaturen en de steeds betere isolatie van woningen in de toekomst zal afnemen.

#### Ruimtelijke verdeling warmtevraag aan de ondergrond

Op lokaal niveau kunnen binnen de stad echter grote verschillen in de toepassingsgraad van WKO bestaan en ook in de verhouding tussen de warmtevraag en de koudevraag van de betreffende gebouwen. Vooral in gebieden waar geconcentreerd gebruik wordt gemaakt van WKO met als hoofddoel verwarming kan de netto warmteonttrekking groter zijn dan de autonome opwarming, wat zal leiden tot afkoeling. Hoe groot de uiteindelijke afkoeling is, hangt af van de grootte van de warmteonttrekking ten opzichte van de autonome opwarming, de snelheid van de grondwaterstroming (toestroming water met de "oorspronkelijke temperatuur") en de grootte van het gebied.

Als het grondwater niet of nauwelijks stroomt, dan zal de temperatuur in eerste instantie steeds verder dalen als onvoldoende warmte wordt opgeslagen (hier staat “in eerste instantie”, omdat de temperatuurdaling op langere termijn zorgt voor extra toestroming van warmte door geleiding: zie ook volgende alinea). Bij een hogere stroomsnelheid van het grondwater wordt de afkoeling beperkt door de toestroming van water met de “oorspronkelijke temperatuur” en stroomt het afgekoelde water af. Afhankelijk van het vraagpatroon in het stroomafwaarts gelegen gebied kan dat gunstig zijn (als de koudevraag overheerst) of ongunstig (als de warmtevraag overheerst). Een eerste indruk kan worden verkregen door de functie van het gebied in kaart te brengen (wonen duidt op warmtevraag; utiliteit duidt op koudevraag).

Als de netto warmteonttrekking groter is dan de netto opwarming zal de bodem afkoelen. De lagere temperatuur zal de warmtetoestroming door geleiding doen toenemen. Als de temperatuur op 20 m diepte bijvoorbeeld 2 °C wordt verlaagd, dan zal dat resulteren in een extra warmtestroom van ongeveer 2 kWh/m<sup>2</sup> per jaar vanaf maaiveld. Deze warmtestroom is evenredig met de temperatuurverlaging (bij een verdubbeling van de temperatuurverlaging verdubbelt ook warmtestroom) en omgekeerd evenredig met de diepte (bij een verdubbeling van de diepte halveert de warmtestroom). Bij het onttrekken van een bepaalde hoeveelheid warmte per jaar aan de ondergrond, zal de temperatuur dus minder sterk dalen als deze onttrekking ondiep plaatsvindt. Gesloten WKO systemen maken hiervan gebruik door op beperkte diepte warmte te onttrekken. Zeer ondiep onttrekken van warmte kan overigens nadelig uitpakken in verband met de seizoensfluctuaties van de bodemtemperatuur in de bovenste meters (relatief lage bodemtemperatuur in het winterseizoen).

Ook vanaf de onderzijde komt warmte toestromen onder invloed van de geothermische gradiënt. In Nederland is deze warmtestroom gemiddeld 0,075 W/m<sup>2</sup>, wat overeen komt met ongeveer 0,7 kWh/m<sup>2</sup> per jaar. Deze extra toevoer van warmte is van belang voor de lange termijn en zorgt ervoor dat de werkelijke levensduur van de warmtevoorraad groter is dan in tabel 4.1 is weergegeven.

## 4.2 Conclusies en aanbevelingen

### Conclusies

- Het 30 jaar gemiddelde van de temperatuur aan de oppervlakte is in de periode 1900-2010 met 1,7 °C opgelopen als gevolg van klimaatverandering. Deze opwarming vond in eerste instantie geleidelijk plaats, maar sinds halverwege de jaren '70 is sprake van een versnelde opwarming. De verwachting is dat deze opwarming zich ook in de toekomst zal voortzetten. Een gevolg van deze opwarming is dat ook de temperatuur van de ondergrond oploopt.
- Als gevolg van het stedelijk warmte-eiland effect ligt de temperatuur in het stedelijk gebied gemiddeld gezien hoger dan in het omliggende landelijke gebied. Uit bodemtemperatuurmetingen is afgeleid dat de oppervlaktetemperatuur in de stedelijke gebieden in Nederland 1 à 3 °C verhoogd is ten opzichte van de niet-stedelijke omgeving.

- Uit berekeningen blijkt dat de opwarming van de ondergrond die sinds 1900 is opgetreden geconcentreerd is in de bovenste 50 à 100 m, hetgeen wordt bevestigd door metingen. Ook de opwarming die de komende 30 jaar verwacht mag worden treedt vooral op in dit deel van de ondergrond.
- Voor het centrum van Den Haag, één van de gebieden met de hoogste dichtheid van (open) WKO-systemen in Nederland, is de invloed van de autonome opwarming vergeleken met de invloed van WKO-systemen. In het eerste watervoerende pakket wordt de komende 30 jaar een temperatuurtoename van ongeveer 0,03 °C per jaar verwacht als gevolg van autonome opwarming. Bij de WKO-systemen wordt gemiddeld gezien een beperkte energie-onbalans verwacht (tussen -10% en +5%) en ligt de te verwachten gebiedsgemiddelde opwarming tussen -0,02 en +0,01 °C per jaar. De invloed van WKO is in dit geval dus kleiner dan de invloed van de autonome opwarming op dezelfde diepte (20-60 m). Op grotere dieptes zal de invloed van WKO in veel gevallen groter zijn.
- De opgetreden en te verwachten opwarming van de ondergrond kan worden gezien als grootschalige (lage temperatuur) warmteopslag. De opgeslagen warmte zou kunnen worden benut met behulp van bodemenergiesystemen in de bovenste 50 à 100 m. Op het platteland wordt jaarlijks meer warmte aan de ondergrond toegevoegd door klimaatverandering dan de er aan warmte gevraagd wordt door de bebouwing aan de oppervlakte. In het stedelijk gebied is de warmtevraag van de bebouwing ongeveer 20 keer zo groot.
- Als de volledige warmtevraag in de stad wordt geleverd vanuit de ondergrond en er geen warmte wordt opgeslagen, dan zal de ondergrond snel afkoelen en is geen sprake van een duurzaam systeem. Doordat tot op heden slechts een zeer klein deel (circa 0,4% in 2009) van de totale warmtebehoefte van de gebouwde omgeving wordt gedekt met (open) WKO-systemen en bodemenergiesystemen niet alleen warmte onttrekken maar ook warmte opslaan (gekoppeld aan het leveren van koeling), zal de opwarming van de ondergrond op stadsniveau de komende decennia groter zal zijn dan de potentiële netto warmteonttrekking door WKO, zelfs als de doelstellingen van de Taskforce WKO worden gehaald.

### **Aanbevelingen**

- De grootte van het stedelijk warmte-eiland effect is gebaseerd op een relatief klein aantal metingen. Om hierover meer zekerheid te verkrijgen zijn meer metingen in en rond stedelijk gebied gewenst.
- Het onderzoek geeft aan dat sprake is van autonome opwarming van de ondergrond. Dit roept de vraag op in hoeverre de eis van een energiebalans voor WKO-systemen reëel is. Door een zekere mate van netto warmteonttrekking toe te staan zou de autonome opwarming geheel of gedeeltelijk gecompenseerd kunnen worden. Aanbevolen wordt om dit aspect in overweging te nemen bij het formuleren van nieuw of aangepast beleid. Hierbij dient ook te worden afgewogen of onderscheid moet worden gemaakt in de diepte waarop de WKO plaatsvindt.

## Literatuur

Aelmans&Houtman. (1985). *Grondwaterkaart van Nederland*. Delft/Oosterwolde: Diens grondwaterverkenning TNO.

Allen, A., Milenica, D. en Sikorac, P., 2003. Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics* 32 (2003) 569–578.

Beltrami, H. B.-R. (2006). Spatial patterns of ground heat gain in the Northern Hemisphere. *Geoph. Res. Lett* 33 (6) .

Bonte, M., Stuyfzand, P.J., van Beelen, P. and Visser, P. (2010a). Onderzoek naar duurzame toepassing van warmte-koudeopslag. H2O / 3 - 2010.

Bonte, M. (2010b). *Monitoring bij warmte-koudeopslag*. KWR.

Bonte, M., Stuyfzand, P.J., van den Berg, G. A. and Hijnen, W. A. M. (2011a). Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality and the consequences for drinking water production: a case study from the Netherlands. *Water Science & Technology* 63(9): 1922-1931.

Bonte, M., Stuyfzand, P.J., Hulsmann, A. and van Beelen, P. (2011b). Underground thermal energy storage: environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society* 16(1): 22.

Bonte, M., Visser, P., Kooi, H., van Breukelen, B., Claas, J., Chacón Rovati, V. and Stuyfzand, P.J. (2011c). Effects of aquifer thermal energy storage on groundwater quality elucidated by field and laboratory investigations. *Proceedings 1<sup>o</sup> Nationaal Congres Bodemenergie*, Utrecht, Nederland.

Brandsma, T. G. (2003). Empirical estimation of the effect of urban heat advection on the temperature series of De Bilt (The Netherlands). 23 (829-845).

Brandsma, T. (2010). *Warmte-eilandeffect van de stad Utrecht*. De Bilt: KNMI.

Brazel, A. P.-C. (2004). Determinants of changes in the regional urban heat island (1990-2004) within metropolitan Phoenix, Arizona, USA. *Climate Research* 33, 2 , 171-182.



Brohan, P. K. (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 111 , D12106.

Buik, N. S. (2004). Analyse van temperatuurmetingen in de Nederlandse ondergrond. *Stromingen (10), nummer 4* , 13-22.

Carslaw&Jaeger. (1959). *Conduction of heat in solids*. blz. 63.

CBS, 2010. Hernieuwbare energie in Nederland 2009.

Conrads, L. (1975). *Observations of meteorological urban effects. The Heat Island of Utrecht*. Universiteit Utrecht: PhD Thesis.

Cote, J. K. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Can. Geotech. J.*42 , 443-458.

De Bruin. (1995). Micrometeorologie. *Landbouwwuniversiteit Wageningen* .

De Jong et al. (1983). Temperatuurveranderingen in het grondwater bij kunstmatige infiltratie bij de Duinwaterleiding van 's-Gravenhage. *H2O nr.20* , 455-460.

De Vries, D. (1966). Thermal properties of soils. *In: W.R. van Wijk (ed.) Physics of plant environment, 2nd ed. North-Holland Pb.Co., Amsterdam* , 210-235.

ECN, 2010. Benutting restwarmte - Notitie aan Werkgroep Heroverweging Energie en Klimaat. ECN-BS--10-015, projectnr. 50656.

EED. (sd). *www.buildingphysicse*. Opgehaald van Earth Energy Designer. EngineeringToolBox. (2007).

Ferguson, G. (2006). Transient lateral heat flow due to land-use changes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 242 (1-2) , 217-222.

Ferguson, G. W. (2004). Subsurface heat flow in an urban environment. *J. Geophys. Res.-Solid Earth* 109 (B2) .

Howard, L. (1833). *Climate of London Deduced from meteorological observations* (Vol. vol.1). London: Harvey and Darton.

IF Technology. (sd).

IF Technology (2007), *Koude/warmteopslag in de praktijk*, Arnhem, p.31.

KNMI. (2006). *Klimaat in de 21e eeuw, vier scenario's voor Nederland*. De Bilt.

KNMI. (2009). *Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's*. De Bilt: Klein Tank, A.M.G. en G. Lenderink.

KNMI. (sd). *www.KNMI.nl*. Opgeroepen op 2011

Kohl, T. (1999). Transient thermal effects below complex topographies. . *Tectonophysics* 306(3-4) , 311-324.

Kooi, H. (2008). Spatial Variability in subsurface warming over the last three decades; insight from repeated borehole temperature measurements in The Netherlands. *Earth and Planetary Science Letters* , 86-94.

Kooi, H., Visser, P. and Bonte, M. (2011). Geothermal conditions and processes in the dutch subsurface to several hundred meters depth. Proceedings 1<sup>e</sup> Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland.

Landsberg, H. (1981). *The urban climate*. New York: Academic Press, 275 p.

Lieten, S. en Dinkla, I. (2012). Literatuurstudie Meer Met Bodemenergie, Overzicht van kennis en onderzoeksvragen rondom bodemenergie - Hoofdstuk 7: Effecten op ondergrondse microbiologie. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Locher, W. H. (1990). Bodemkunde van Nederland, deel 1.

Meer Met Bodemenergie, rapport 3/4 Effecten op de ondergrond. Effecten van bodemenergiesystemen op de geochemie en biologie in de praktijk. Resultaat metingen op pilotlocaties en labtesten. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Meer Met Bodemenergie, rapport 7 Interferentie. Effecten van bodemenergiesystemen op hun omgeving – modellering grootschalige inpassing in stedelijke gebieden. Bioclear, IF Technology, Deltares en Wageningen University, 2012.

Mineralogy, H. o. (version 1.2).

Nordell, 2005. Global warming is large-scale thermal energy storage. Proceedings Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption - Fundamentals, Case Studies and Design. Izmir, Turkey, 6–17 June 2005.

N.V.O.E./Caljé. (2006).

Oke, T. R. (1973 ). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment Pergamon Press* , Vol. 7, pp 769-779.

Platform Communication on Climate Change, P. (2009). *www.klimaatportaal.nl*.

Pollack, H. (1993). Climate change inferred from borehole temperatures. *Global and Planetary Change*, 7 , 173-179.

Pollack, H. (2000). Climate reconstruction from subsurface temperatures. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*28 , 339-365.

Provincie-Utrecht. (2008). *Klimaat-effectschetsboek Utrecht; Groeiboek met eerste inventarisatie van mogelijke klimaatveranderingseffecten- en gevolgen*. Utrecht: Alterra, DHV B.V., KNMI, VU.

Stolk, P. (2000). Analyse van temperatuurmetingen in de Nederlands ondergrond (20-300 m beneden maaiveld) in relatie tot hydrologische en meteorologische omstandigheden in heden en verleden. *IF Technology/VU Amsterdam* .

Taniguchi, M. J.-S. (1999b). Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow:1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan. *Water resources research*, vol. 35, no. 5 , 1507-1517.

Taskforce WKO (2009). Groen licht voor bodemenergie - Advies Taskforce WKO, 23 maart 2009.

Taylor, C. S. (2009). Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. *Journal of Hydrology*, 375 , 601-612.

Van Dalfsen, W. (1981). Geothermal investigation in shallow observation wells; the shallow subsurface temperature field in the Netherlands. *Groundwater survey TNO* .

Van der Molen, M. K. (2008). Warmteindringing in de bodem als functie van oppervlaktebedekking. *Bijdrage van de Vrije Universiteit Amsterdam aan het onderzoek 'Waterkwaliteit in Leidingnet'* .

Visser, P. Kooi, H., and Bonte, M. (2011). The influence of aquifer thermal energy storage (ATES) on the subsurface heat balance, in relation to other natural and man induced processes. Proceedings 1<sup>e</sup> Nationaal Congres Bodemenergie, Utrecht, Nederland.

Voogt, J. (Jaar onbekend). How Researchers Measure Urban Heat Islands. *Presentatie* .

Wee, V. (2009). Warmte-koudeopslag in de bodem kan efficiënter. *H2O* .

Woestenburg, M. (2010). *Klimaat in de stad-Tussentijdse rapportage van het dialoogproject Klimaat in de stad*. Alterra Wageningen UR, TU Delft.

[www.cbs.nl](http://www.cbs.nl). (sd). [www.cbs.nl](http://www.cbs.nl).

[www.cos.rotterdam.nl](http://www.cos.rotterdam.nl). (sd). *Energieverbruik door Rotterdamse huishoudens 2004, Gemeente Rotterdam*. Opgehaald van [www.cos.rotterdam.nl](http://www.cos.rotterdam.nl).

<http://agentschap.nl/kaartenbalie.nl>)

Yalcin, T. en Yetemen, O., 2009. Local warming of groundwaters caused by the urban heat island effect in Istanbul, Turkey. *Hydrogeology Journal* (2009) 17: 1247–1255.

Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K.D. en Bayer, P., 2010. The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res. Lett.* 5 (2010) 044002 (6pp).

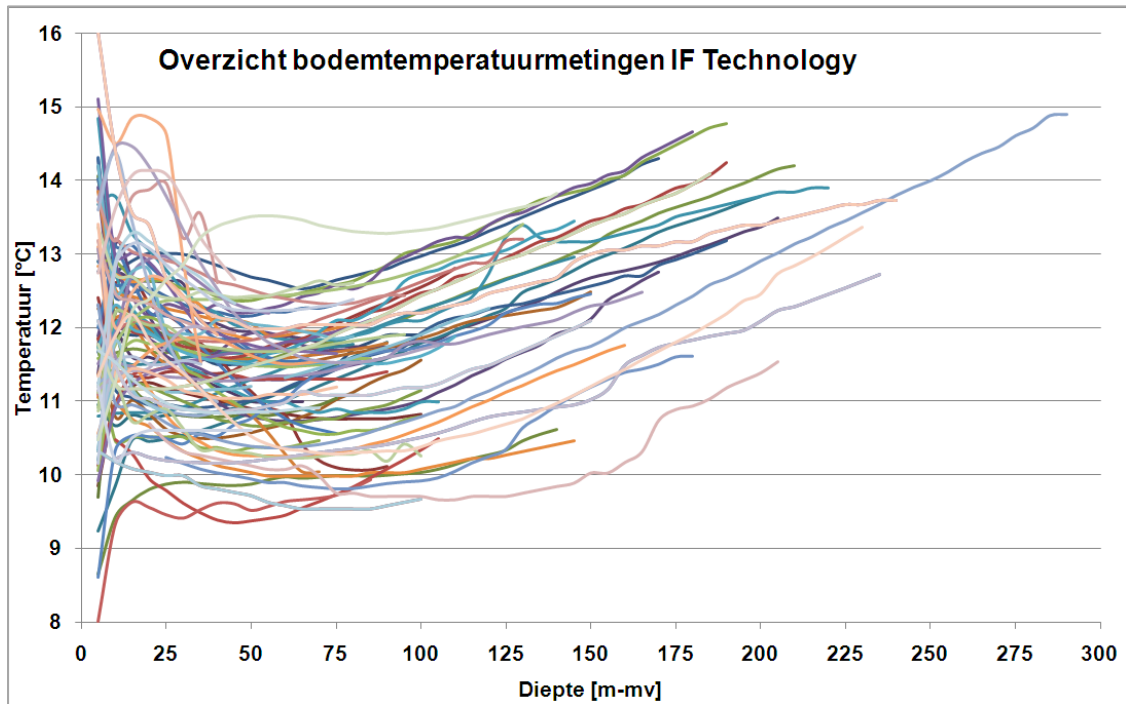
# **Bijlage I**

## **Bodemtemperatuurmetingen IF Technology**

De bodemtemperatuurmetingen van IF Technology die gebruikt zijn in dit rapport (figuur B2) zijn afkomstig uit de effectenstudies en monitoringsrapportages van IF Technology. Deze bodemtemperatuurmetingen zijn veelal metingen die gedaan zijn bij proefboringen en dus niet beïnvloed door WKO systemen. De locaties en legenda van deze figuur zijn hieronder weergegeven.



figuur B1. Locaties van aanwezige bodemtemperatuurmetingen van IF Technology.



- |  |  |
|--|--|
| 9312 22-10-1992 Groene Hart Ziekenhuis Gouda             | 9602 3-5-1994 Essent Groningen                           |
| 9949 11-4-1996 TU Eindhoven                              | 9530 26-1-1998 UMC Utrecht AZU WKZ                       |
| 51176 12-9-2001 Datus Utrecht                            | 52107 10-07-2002 Meerpaal Houten                         |
| 51210 16-7-2002 Merwehoofd Papendrecht                   | 52165 6-11-2002 Nieuw Wolfselaar Breda                   |
| 51158 7-1-2003 Spoorwijk Den Haag                        | 52241 8-4-2003 Waterrand Zoetermeer                      |
| 52173 24-7-2003 LUMC Leiden                              | 53165 21-8-2003 Lutkemeer Amsterdam                      |
| 52233 31-10-2003 Postbank Arnhem                         | 53135 19-2-2004 LSOP Apeldoorn                           |
| 53176 11-3-2004 PGGM Zeist                               | 55101 25-5-2004 Gemeentehuis Steenberg                   |
| 54175 25-5-2004 Proefboring Technopolis Delft            | 51247 25-5-2004 ETV Apeldoorn                            |
| 54107 5-10-2004 Park Langesteijn in Hendrik-Ido Ambacht  | 54106 27-10-2004 Ziekhuis Reinier de Graaf Delft         |
| 9623 3-2-2005 Gelredome Arnhem                           | 55137 28-4-2005 IKEA Amersfoort                          |
| 54148 16-6-2005 Smedinghuis Lelystad                     | 55179 15-9-2005 Tramsingel Breda                         |
| 54101 16-5-2006 RGC Arnhem                               | 56373 29-5-2006 Gemeentehuis Eemnes                      |
| 55131 5-9-2006 Provinciehuis Flevoland Lelystad          | 56326 6-3-2007 Leyweg Den Haag                           |
| 51211 6-4-2007 HTC Eindhoven                             | 57223 21-5-2007 Verzorgingshuis Oosterheem te Oosterhout |
| 56160 4-6-2007 Lange Land Ziekenhuis Zoetermeer          | 56115 12-6-2007 Leerpark Dordrecht                       |
| 56399 13-9-2007 Albert Schweitzer Ziekenhuis Dordrecht   | 56417 19-9-2007 Rabobank Vallei en Eem, Ede              |
| 57205 2-10-2007 MFC Malburgen, Arnhem                    | 51236 9-4-2008 Kantongerecht Bergen op Zoom              |
| 57331 9-4-2008 Fort Moermont Bergen op Zoom              | 57247 2-7-2008 Tradepark Tilburg                         |
| 58232 23-9-2008 Centraal Station Den Haag                | 51160 9-12-2008 Flevoziekenhuis Almere                   |
| 57183 23-12-2008 Meerkanten Ermelo                       | 57358 14-1-2009 Kemkensberg Groningen                    |
| 58416 17-3-2009 PB De Springplank Emmen                  | 58295 23-7-2009 Gemeentehuis Doorn                       |
| 57491 9-9-2009 Zorgcentrum Alde Steeg te Beuningen       | 58395 24-11-2009 VMBO Meerwaarden Barneveld              |
| 59503 2-12-2009 Forteck Groeseind Tilburg                | 60171 17-3-2010 PB Forteck Biddinghuizen                 |
| 56176 24-3-2010 Ziekenhuis Tergooi Ziekenhuis Hilversum  | 58424 16-4-2010 Breda                                    |
| 9526 28-4-2010 Provinciehuis Utrecht                     | 59128 6-5-2010 Woningstichting Eigenhaard A-dam          |
| 59474 18-5-2010 Proefboring Leerpark Drachten            | 55129 8-6-2010 MCA Arnhem                                |
| 59263 15-6-2010 Martinez Almere                          | 59262 16-6-2010 Carlton Almere                           |
| 57376 8-7-2010 IJsselwaerde IJsselstein                  | 60208 25-8-2010 Springterrein te Breda                   |
| 59359 14-9-2010 Jofra Poultry Someren                    | 57517 13-10-2010 NIOO Wageningen                         |
| 60130 17-2-2011 Medisch Spectrum Twente te Enschede      | 54148 8-3-2011 Smedinghuis Lelystad                      |
| 50125 20-5-2011 Mahler 4                                 | 50170 20-5-2011 De Trompet, Heemskerk                    |
| 9614 30-10-2001 Levob Kantoren Hoofddorp                 | 9704 29-4-2003 KPNG de Meern                             |
| 9815 14-10-2000 Twee Stedenziekenhuis Waalwijk           | 50140 17-2-2009 Eempolis Amersfoort                      |
| 50191 7-6-2011 Paleis van Justitie Den Haag              | 51135 23-1-2002 Rabofacet Best                           |
| 51188 13-9-2005 Kunstkluster Tilburg                     | 52262 8-1-2003 Drukkerij Dalfsen                         |
| 53132 29-10-2003 Priva Campers De Lier                   | 53221 9-10-2003 IKEA Haarlem                             |
| 54159 30-6-2010 Bavar Rutten                             | 55296 16-5-2006 RGC Arnhem                               |
| 56173 24-8-2006 Bedrijventerrein Borchwerf te Roosendaal | 56411 22-3-2007 Zorgcentrum Laarsteden Nistelrode        |
| 57112 1-4-2008 Koning Willem III Kazerne A-Doorn         | 57410 25-5-2004 Proefboring Technopolis Delft            |
| 57470 25-5-2004 ETV Apeldoorn                            | 58218 8-4-2009 Proefboring Venray                        |
| 58244 23-9-2008 Centraal Station Den Haag                | 58343 18-3-2009 Breda                                    |
| 58382 28-4-2011 St Elisabeth Ziekenhuis Tilburg          | 59434 10-5-2011 Proefboring Stadhuis Almelo              |
| 60517 24-11-2009 VMBO Meerwaarden Barneveld              | 61101 11-4-2011 Bergerweg Sittard                        |
| 61114 11-5-2011 Hoofdstad Zuid Apeldoorn                 | 989530 8-7-1999 AZU/WKZ                                  |

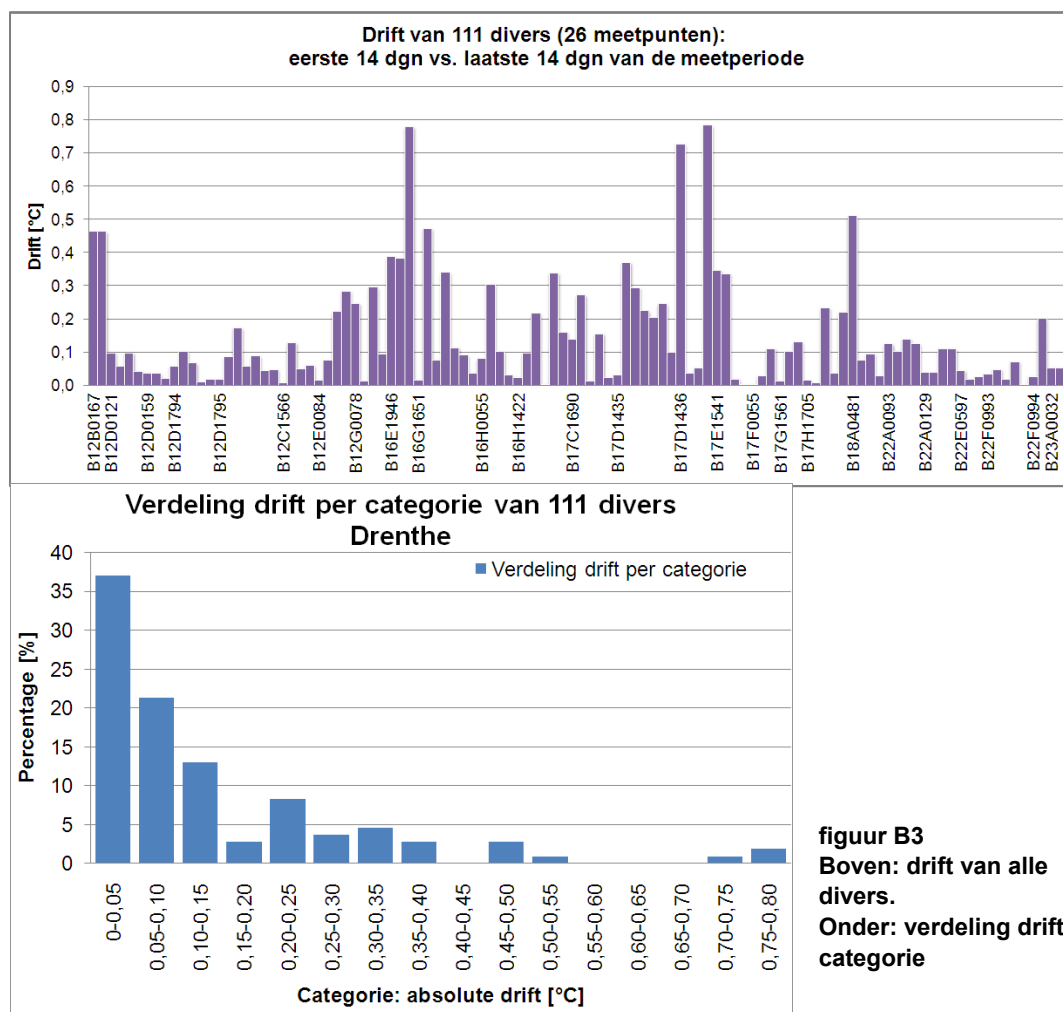
figuur B2. Overzicht en legenda bodemtemperatuurmetingen IF Technology.

## **Bijlage II**

# **Betrouwbaarheid en drift temperatuurgegevens divers**



De drift geeft het meetverloop van het meetstelsel aan. Er is sprake van drift als de meetafwijking van het instrument in de loop van de tijd verandert. Door bijvoorbeeld verandering van de temperatuur van onderdelen van het meetinstrument, veranderingen in de voedingsspanning van het meetinstrument, slijtage of ouderdom kan de meetnauwkeurigheid afnemen ten opzichte van het begin van de meetperiode. Door van elk meetpunt van het diversennetwerk waar 4 of meer divers hangen, de toename (of afname) van de absolute afwijking van de gemiddelde temperatuur te bepalen van de eerste en laatste 14 meetdagen die voor alle divers beschikbaar zijn, is de drift van 111 divers bepaald die over 26 meetpunten verspreid hangen. De aldus bepaalde drift is voor 71% van de divers kleiner dan 0,15 °C en voor 82% kleiner dan 0,25 °C. Een klein deel van de divers vertoont echter een grotere drift, tot maximaal 0,8 °C.



**figuur B3**  
**Boven: drift van alle divers.**  
**Onder: verdeling drift per categorie**

In tabel B1 zijn over de gehele meetperiode de gemiddelde afwijkingen van de divers ten opzichte van de gemiddelde temperatuur van alle divers in hetzelfde meetpunt opgenomen. Bij de meeste divers blijft de afwijking beperkt tot 0,1 à 0,2 °C. Er zijn echter ook divers met afwijkingen van 0,2 tot 0,5 °C. Voor dit onderzoek zijn dat relatief grote afwijkingen, zeker als men bedenkt dat de ene diver 0,4 hoger meet dan het gemiddelde en de andere diver 0,4 lager: het verschil tussen de divers is daarmee 0,8 °C.

**tabel B1 Meetperiode en aantal divers Drenthe.**

begin metingen	Einde metingen	meetpunt	gem.diepte m-mv	aantal divers	gemiddelde temperatuur over geme-ten periode	gemiddelde afwijking per diver t.o.v. de gemiddelde temperatuur van alle divers in het meetpunt over de totale meetperiode							
						1	2	3	4	5	6	7	
11-9-2009	22-6-2010	B12C1566	4,71	4	9,1	0,07	0,08	0,08	0,11				
26-8-2009	16-6-2010	B12D0121	4,56	4	9,9	0,08	0,05	0,06	0,06				
26-8-2009	22-6-2010	B12D0159	4,28	3	10,1	0,07	0,08	0,07					
11-9-2009	24-6-2010	B12D1794	4,63	5	9,3	0,13	0,09	0,1	0,05	0,13			
11-9-2009	24-6-2010	B12D1795	4,55	7	10,2	0,14	0,16	0,16	0,12	0,09	0,09	0,11	
11-6-2008	17-6-2010	B12G0078	4,1	5	10,5	0,34	0,06	0,18	0,24	0,1			
9-10-2009	1-7-2010	B16E1946	4,73	4	9,8	0,21	0,2	0,4					
9-10-2009	1-7-2010	B16G1651	4,6	7	8,8	0,19	0,32	0,15	0,21	0,21	0,13	0,08	
1-9-2009	1-7-2010	B16H0055	4,58	4	10,4	0,17	0,27	0,13	0,13				
9-10-2009	1-7-2010	B16H1422	4,65	6	10,4	0,26	0,1	0,16	0,06	0,2	0,1		
13-10-2009	1-7-2010	B17C1690	4,6	5	8,8	0,09	0,14	0,11	0,16	0,05			
13-10-2009	5-7-2010	B17D1435	4,61	7	10,8	0,16	0,2	0,17	0,15	0,17	0,14	0,12	
10-10-2009	5-7-2010	B17D1436	4,65	4	9,5	0,35	0,08	0,07	0,36				
10-10-2009	27-6-2010	B17E1541	4,59	4	8,6	0,23	0,15	0,07	0,08				
3-9-2009	28-6-2010	B17F0055	9,36	4	9,5	0,27	0,11	0,09	0,06				
10-10-2009	5-7-2010	B17G1561	4,65	3	9,7	0,29	0,14	0,19					
14-10-2009	5-7-2010	B17H1705	4,56	5	9,9	0,11	0,04	0,12	0,31	0,179			
10-10-2009	28-6-2010	B18A0481	4,67	4	11,0	0,5	0,13	0,07	0,07				
1-9-2009	4-7-2010	B22A0093	4,74	4	10,7	0,14	0,25	0,15	0,12				
1-9-2009	4-7-2010	B22A0129	4,37	2	9,2	0,04	0,04						
1-9-2009	4-7-2010	B22A0129	5,48	2	9,4	0,07	0,07						
13-10-2009	6-7-2010	B22E0597	4,61	3	8,6	0,06	0,07	0,11					
14-10-2009	7-7-2010	B22F0993	4,55	5	8,8	0,08	0,06	0,04	0,062	0,06			
14-10-2009	7-7-2010	B22F0994	4,52	2	10,0	0,04	0,14	0,25					
22-1-2008	6-7-2010	B23A0032	4,32	2	10,8	0,12	0,12						

## Deelnemende bedrijven en instanties

Agentschap NL / Bodem+

Arcadis

Bioclear

Brabant Water - Hydreco

Deltares

Eneco

Essent

Gemeente Almelo

Gemeente Amersfoort

Gemeente Apeldoorn

Gemeente Den Bosch

Gemeente Deventer

Gemeente Haarlem

Gemeente Hengelo

Gemeente Tilburg

Gemeente Utrecht

Gemeente Zwolle

Havenbedrijf Rotterdam

IF Technology

Ministerie van Infrastructuur & Milieu

NVOE

Productschap Tuinbouw

Provincie Drenthe

Provincie Flevoland

Provincie Friesland

Provincie Gelderland

Provincie Groningen

Provincie Limburg

Provincie Noord-Brabant

Provincie Noord-Holland

Provincie Overijssel

Provincie Utrecht

Provincie Zeeland

Provincie Zuid-Holland

SBNS

SKB

Vewin

Vitens

Wageningen Universiteit

Waterschap Groot Salland

Waterschap Regge en Dinkel

