



De opwarming van de bodem en de gevolgen voor de natuur

Guido Bakema, Marius Heinen, Martin Kotters en Nils van Rooijen



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

De opwarming van de bodem en de gevolgen voor de natuur

Guido Bakema, Marius Heinen, Martin Knotters en Nils van Rooijen

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoekthema KB programma 36-001-024: Biodiversity in a nature inclusieve society.

Wageningen Environmental Research
Wageningen, mei 2023

Gereviewd door:
Dorothee van Tol-Leenders, Themaleider Bodem en Landgebruik (WENR)

Akkoord voor publicatie:
Mirjam Hack-Ten Broeke, teamleider BWL

Rapport 3256
ISSN 1566-7197

Klimaatverandering is er de oorzaak van dat de bodemtemperatuur van de bovenste 100 cm van de bodem de afgelopen veertig jaar met gemiddeld 1.5°C is toegenomen en de komende dertig jaar nog met 1.2°C zal stijgen. De mate van stijging wordt sterk bepaald door de vegetatie. Zo zal kale grond veel sneller en sterker opwarmen dan met gras begroeide grond. Een natuurbeheerder kan dus invloed uitoefenen op de bodemtemperatuur via de vegetatie, maar daarbij zal de maatregel op de vegetatie leidend zijn. Er is dringend behoefte aan een integraal begrip van warmte en water in de bodem-gewas-atmosfeerdynamiek om de risico's van bodemtemperatuurverhoging beter te begrijpen en om de teeltsystemen en natuurbeheersystemen op passende wijze aan te passen aan deze samengestelde klimaateffecten.

Climate change has caused the soil temperature of the upper 100 cm to increase by an average of 1.5°C over the past forty years and will continue to increase by 1.2°C over the next thirty years. The rate of increase is strongly determined by vegetation. For example, bare soil will warm much faster and more strongly than grass-covered soil. Thus, nature developers can influence soil temperature through vegetation, but the type of measure on will define the effect. An integrated understanding of temperature and water dynamics in the soil-crop-atmosphere system is urgently needed to better understand the risks of soil temperature elevation and to appropriately adapt cropping and nature development systems to these integrated climate effects.

Trefwoorden: klimaatverandering, bodemtemperatuur, natuurontwikkeling, opwarming van de aarde

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/585745> of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2023 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Wageningen Environmental Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.



Wageningen Environmental Research werkt sinds 2003 met een ISO 9001 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem.

In 2006 heeft Wageningen Environmental Research een milieuzorgsysteem geïmplementeerd, gecertificeerd volgens de norm ISO 14001.

Wageningen Environmental Research geeft via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Inhoud

Verantwoording	5
Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding en probleemstelling	11
1.2 Doelstelling en afbakening	11
1.3 Leeswijzer	12
2 Tijdreeksanalyse bodem- en luchttemperatuur	13
2.1 Inleiding	13
2.2 Exploratieve data-analyse natuurgebieden	14
2.2.1 Veenkampen	14
2.2.2 Loobos	17
2.3 Trendanalyse natuurgebieden Veenkampen en Loobos	18
2.4 Relatie luchttemperatuur – bodemtemperatuur	20
2.4.1 De Veenkampen	20
2.4.2 Loobos	22
2.5 Ontwikkeling bodemtemperatuur De Bilt	23
2.6 Conclusies tijdreeksanalyses	24
3 Ontwikkeling bodemtemperaturen bij verschillende bodembedekkingen	25
3.1 Inleiding en aanpak	25
3.2 Modelonderzoek: opgelegde bodemtemperatuur aan maaiveld	25
3.3 Modelonderzoek: opgelegde warmteflux aan maaiveld	26
3.4 Modelleren warmteflux en bodemtemperatuur	28
3.5 Bodemtemperatuur en warmteflux bij gras en kale bodem voor locatie De Veenkampen	31
3.6 Simulaties met SWAP-WOFOST voor locatie De Veenkampen	34
3.6.1 Resultaat gras	35
3.6.2 Resultaat kale grond	37
3.6.3 Discussie dataset en modellering De Veenkampen	39
3.7 Conclusies berekening bodemtemperatuur	42
4 Opwarming van de bodem en de gevolgen voor de natuur	43
4.1 Inleiding	43
4.2 De duinen	45
4.3 Hellingbossen	47
4.4 Conclusies bodemtemperatuur en natuur	49
5 Conclusie en vervolgonderzoek	51
Literatuur	54
Bijlage 1 Literatuur over bovenrandvoorwaarde voor bodemtemperatuur	56
Bijlage 2 Aanpassing numerieke schema bodemtemperatuur	65
Bijlage 3 Trendanalyse	66
Bijlage 4 Resultaten transfer-ruismodellering	67

Verantwoording

Rapport: 3256

Projectnummer: 5200046940

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Themaleider Bodem en Landgebruik

naam: Dorothée van Tol-Leenders

datum: 18 april 2023

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 2 mei 2023

Woord vooraf

Als er wordt gesproken over het opwarmen van de aarde, dan wordt daar vrijwel altijd de stijging van de luchttemperatuur mee bedoeld. Opvallend hierbij is dat er naar de werkelijke opwarming van de aarde, ofwel de bodem (de ondergrond), weinig onderzoek is gedaan en dat meetdata beperkt beschikbaar zijn. Wageningen Environmental Research (WENR) is een inventariserend onderzoek gestart om te bepalen in hoeverre de aarde/bodem in Nederland is opgewarmd en welke effecten dit heeft op de biotische en abiotische omstandigheden.

Het onderzoek is ondersteund vanuit Kennisbasisprogramma 36-001-024: *Biodiversity in a nature inclusive society*, als onderdeel van de wettelijke onderzoekstaken Natuur en Milieu (WOT N&M). Het eerste deel van het onderzoek is gerapporteerd in 2022: *De invloed van klimaatverandering op de bodemtemperatuur* (Bakema et al., 2022) <https://edepot.wur.nl/566436>.

Samenvatting

De verandering van de luchttemperatuur door klimaatverandering wordt voor een gedeelte gebufferd doordat er warmte wordt opgeslagen in de bodem. Die extra warmte veroorzaakt een stijging van de bodemtemperatuur. In het eerste deel van het onderzoek dat gerapporteerd is in 2022 werd duidelijk dat de bodemtemperatuur de afgelopen veertig jaar met ca. 1,5°C is toegenomen en dat dit van significante invloed is op de diverse bodemprocessen en de ontwikkeling van vegetatie. Op basis van die bevindingen is dit vervolgonderzoek gestart met de focus op:

- het bepalen van de bodemtemperatuurontwikkeling van de afgelopen veertig jaar in enkele natuurgebieden;
- het ontwikkelen van een berekeningsmethode om de toekomstige bodemtemperatuur onder diverse bodem- en gewascondities te bepalen;
- het beschrijven van de gevolgen die een veranderende bodemtemperatuur kan hebben op de ontwikkeling van enkele specifieke natuurgebieden.

Het onderzoek betreft data-analyse en tijdreeksmodellering en enkele verkennende studies met simulatiemodellen. De belangrijkste conclusies zijn:

De bodemtemperatuur zal de komende dertig jaar met 1.2°C verder stijgen.

Metingen tonen aan dat de bodemtemperatuur de afgelopen veertig jaar tussen de 1.2 en 1.8°C is toegenomen en dat deze een sterke correlatie heeft met de luchttemperatuur (Bakema et al., 2022). Indien de relatie luchttemperatuur-bodemtemperatuur gelijk blijft, is de verwachting dat de bodemtemperatuur de komende dertig jaar nog met 1.2°C zal gaan toenemen. Dit maakt dat de bodemtemperatuur in 2050 ten opzichte van 1980 ca. 2.7°C hoger zal liggen.

De bodemtemperatuur stijgt op kale grond sneller dan op grond die begroeid is met gras.

Metingen geven aan dat de bodemtemperatuur van kale grond ca. 30% sneller stijgt dan grond die met gras begroeid is. Ook worden er bij kale gronden op grotere diepte grotere veranderingen waargenomen. Wellicht belangrijker dan de gemiddelde temperatuurverandering is het grote verschil in temperatuurdynamiek. Zo worden er bij kale grond in de zomer bodemtemperaturen van boven de 50°C gemeten, terwijl die voor grasland niet boven de 25°C uitkomen.

De bodemtemperatuur lijkt in bossen minder snel te stijgen dan in grasland.

Op basis van de relatief beperkte metingen aan één type bos (naaldbomen) blijkt dat de bodemtemperatuur in dit type bos vergelijkbaar is met die gemeten onder grasland. Uit internationaal onderzoek blijkt dat de bodemtemperatuur onder dichte en vochtige bossen mogelijk minder snel zal gaan stijgen. Verder zal mogelijk door het aanpassen van het beheer (minder kap) de luchttemperatuur in bossen minder snel zijn gestegen, met als gevolg ook een minder sterke stijging van de bodemtemperatuur.

Het type vegetatie is van sterke invloed op de bodemtemperatuur.

De bodemtemperatuurmetingen in Nederland zijn gemeten onder kort gemaaid gras, kale grond en naaldbos en geven daarmee een beperkt beeld van de invloed van diverse vegetatietypes. Berekeningen geven echter aan dat het type vegetatie sterk van invloed is op de seizoensmatige en dagelijkse bodemtemperatuurveranderingen, maar beperkter op de langjarige veranderingen.

Bodemtemperatuurdifferentiatie is mede een gevolg van de natuurontwikkeling.

Bodemtemperatuur is niet zozeer een oorzaak, maar eerder een gevolg van de natuurontwikkeling boven het maaiveld. Het beheer van die natuur is doorslaggevend voor veranderingen in bodemtemperatuur en de mate waarin luchttemperatuur effect heeft op de temperatuur van de bovenste bodemlagen. Door het kort en open houden van de vegetatie, krijgt het milieu meer vat op de bodemtemperatuur, waarbij de temperatuursextremen worden vergroot.

De stijging van de bodemtemperatuur kan een significant effect op de vegetatieontwikkeling hebben.

De successie in vegetatie is inherent verbonden aan de ontwikkeling in de bodemtemperatuur. Daarom zijn de gevolgen van een stijging van de bodemtemperatuur op natuurontwikkeling en de oorzaken van veranderingen in bodemtemperatuur moeilijk van elkaar te onderscheiden. Als er wordt uitgegaan van een stijging van de bodemtemperatuur die in enige mate de stijging van de luchttemperatuur volgt, zal dit in het algemeen de successie in vegetatie versnellen en daarmee, zonder ingrijpen, de stijging van bodemtemperatuur op termijn afremmen.

De stijgende bodemtemperatuur is met name van invloed op pioniermilieus.

Bodemtemperatuurverandering zal voornamelijk consequenties hebben voor de pioniermilieus, waar successie en kiemkracht nog door de aanwezige bodemtemperatuur worden beïnvloed. Zodra er een vegetatie ontstaat, zal die direct effect hebben op de bodemtemperatuur.

Natuurbeheer kan invloed hebben op de autonome bodemtemperatuurverandering.

Door de alom aanwezige feedbackloop van vegetatie op de bodemtemperatuur is er eigenlijk geen sprake van een autonome verandering van de bodemtemperatuur los van de omgevingstemperatuur. Een vegetatiestructuur zal een remmend effect hebben op additionele opwarming door bijvoorbeeld instraling. Een natuurbeheerder kan dus invloed uitoefenen op de bodemtemperatuur via de vegetatie, maar daarbij zal de maatregel op de vegetatie leidend zijn.

De verandering van bodemtemperatuur moet een grotere rol krijgen in onderzoek naar klimaatverandering.

Tijdens het onderzoek is duidelijk geworden dat bodemtemperatuur invloed heeft op de diverse biotische en abiotische processen. De mate waarin en hoe deze gaan wijzigen onder invloed van klimaatverandering zal beter onderzocht moeten worden, zeker wanneer dit betrekking heeft op de invloed van bodemtemperatuurverandering op de ontwikkeling van natuurgebieden en de agrarische productie.

Metingen aan bodemtemperatuurmetingen op alle KNMI-sites en bij bodemonderzoeken.

De bodemtemperatuur is een gefilterde luchttemperatuur: uitgedempt en vertraagd maakt het langjarige trends in luchttemperatuur beter zichtbaar. Dit pleit ervoor om minimaal bij alle bestaande KNMI-sites ook de bodemtemperatuur tot 1,5 m -mv te gaan meten. Daarnaast zal bij alle veldonderzoeken op het gebied van bodemfysica, bodemkwaliteit, veenoxidatie, koolstofvastlegging etc. de bodemtemperatuur moeten worden gemeten.

Meer integraal onderzoek nodig aan warmte en water in de bodem-gewas-atmosfeerdynamiek.

In dit rapport ligt de focus op bodemtemperatuur als afzonderlijke factor. Daarmee wordt wellicht gesuggereerd dat bodemtemperatuur het enige aspect is dat een rol speelt in het bodem-gewas-atmosfeersysteem. Er is dringend behoefte aan een integraal begrip van warmte en water in de bodem-gewas-atmosfeerdynamiek om de risico's beter te begrijpen en om de teeltsystemen op passende wijze aan te passen aan deze samengestelde klimaateffecten.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding en probleemstelling

Bodemtemperatuur is belangrijk voor het kiemen en groeien van planten en heeft invloed op natuurontwikkeling, bodemleven (plantenwortels, micro-organismen en bodemdieren), veenoxidatie, de opname of uitstoot van broeikasgassen en andere biogeochemische processen, zwellen/krimpen van gronden en droogtegevoeligheid van gronden (Brownmang, 2018). Daarnaast kan de bodemtemperatuur de infrastructuur in en op de grond beïnvloeden (denk aan (stroom)kabels en (water)leidingen).

In 2021 is een eerste aanzet gemaakt om de kennis over de ontwikkeling van de bodemtemperatuur en de gevolgen die dit heeft op de biotische en abiotische processen in de bodem te vergroten (Bakema et al., 2022). De belangrijkste conclusies uit dat eerste onderzoek zijn:

- De bodemtemperatuur in de bovenste 100 cm is de afgelopen veertig jaar met gemiddeld 1,5°C toegenomen.
De bodemtemperatuur zoals gemeten op vijf verschillende dieptes (tussen 0,05-1,0 m -mv) op vier KNMI-sites heeft een directe relatie met de gemeten luchttemperatuur op 1,5 m boven maaiveld. Voor drie van de vier sites is de bodemtemperatuur, net als de luchttemperatuur, de afgelopen veertig jaar met 0,030 tot 0,045°C per jaar toegenomen. Dit betekent een stijging tussen de 1,2 en 1,8°C. De vier KNMI-sites zijn allemaal ingericht als grasland. De verwachting is, op basis van buitenlandse experimenten, dat in gebieden met beperkte vegetatie zoals heidevelden, duinen en zandverstuivingen de bodem sterk kan uitdrogen, waardoor de bodemtemperatuur veel sterker kan stijgen dan de gemiddelde luchttemperatuur.
- Bodemprocessen versnellen als gevolg van verhoging bodemtemperaturen.
De bodemtemperatuur is een van de factoren die meespeelt in bodemprocessen, zoals mineralisatie, veenoxidatie en denitrificatie. Een stijging van de bodemtemperatuur leidt tot een versnelling van bodemprocessen, maar de mate waarin is niet eenduidig. Klimaatverandering betekent ook dat de bodemvochthuishouding gaat veranderen. In perioden van droogte zal het bodemvocht afnemen. Dat heeft invloed op allerlei bodemprocessen, maar ook op gewasopname.
- De effecten van bodemtemperatuurstijging voor natuurontwikkeling en bodemleven is sterk afhankelijk van het door de vegetatie veroorzaakte microklimaat.
Bodemtemperatuur is slechts een van de vele factoren die meespelen in de ontwikkeling van natuurlijke begroeiingen. Daarbij is er een sterke interactie tussen de vegetatie en de bodemtemperatuur, waarbij het effect van vegetatie op de bodemtemperatuur groter is dan dat van de bodemtemperatuur op de vegetatie. Dat betekent dat bodemtemperatuur erg afhankelijk is van het microklimaat ter plekke. De toename van de temperatuur op landelijk niveau (macroschaal) kan leiden tot het verdwijnen of het zich juist beter ontwikkelen van bepaalde soorten. Plantengroei wordt echter lokaal sterk beïnvloed door het aanwezige microklimaat). De lokale variatie in temperatuur en vocht is belangrijker dan het macroklimaat.

1.2 Doelstelling en afbakening

Mede gebaseerd op het onderzoek uit 2021 zijn voor dit vervolgonderzoek de volgende doelen gesteld:

- Het bepalen van de bodemtemperatuurontwikkeling van de afgelopen veertig jaar in enkele natuurgebieden;
- Het ontwikkelen van een berekeningsmethode om de toekomstige bodemtemperatuur onder diverse bodem- en gewascondities te bepalen;
- Het beschrijven van de gevolgen die een veranderende bodemtemperatuur kan hebben op de ontwikkeling van enkele specifieke natuurgebieden.

Het onderzoek kent de volgende afbakening:

- Het onderzoek richt zich op temperatuurveranderingen in de bovenste 2 m van de bodem onder invloed van klimaatverandering. Andere aspecten die de temperatuur kunnen verhogen, worden niet meegenomen (zoals het stedelijke hitte-eiland). Er is gekeken naar het landelijk gebied, zowel agrarische als natuurgebieden.
- Er is gebruikgemaakt van bestaande data. Gezien de beperkte duur van het onderzoek zijn geen nieuwe meetsites ingericht. Het gaat hier om open access temperatuur- en bodemdata verschaft door het KNMI, WUR en andere bronnen en om historische vegetatiegegevens die binnen WUR beschikbaar zijn in de Landelijke Vegetatiedatabank (SynBioSys, 2021).

1.3 Leeswijzer

Om te weten hoe de bodemtemperatuur zich de afgelopen veertig jaar heeft ontwikkeld, is een analyse gedaan van de bodemtemperatuurmetingen die uitgevoerd zijn in een tweetal natuurgebieden. Het betreft de locatie Loobos begroeid met naaldbomen en de locatie Veenkampen bestaande uit grasland en kale gronden op veengronden (hoofdstuk 2). De analyse maakt duidelijk of en in welke mate de bodemtemperatuur is veranderd en welke factoren hier, naast de toename van de luchttemperatuur, een rol spelen. Het gaat daarbij om de gemiddelde verandering, maar ook om de veranderende dynamiek van de bodemtemperatuur (dag-nachtritme, seizoensritme etc.).

Ten slotte is met het ontwikkelde tijdreeksmodel voor de KNMI-locatie De Bilt een voorspelling gemaakt van de bodemtemperatuur in de komende decennia.

De statistische analyse geeft een beeld van de ontwikkeling van de bodemtemperatuur op een bepaalde locatie. Om een vertaling te maken naar andere bodem- en vegetatietypes is een temperatuurmodel ontwikkeld op basis het bestaande agrohydrologische model SWAP-WOFOST (hoofdstuk 3). Met dit model is getracht te bepalen wat de invloed van de diverse vegetatietypes is op de langjarig bodemtemperatuurontwikkeling.

Om te zien of de berekende en gemeten bodemtemperatuurveranderingen ook terug te zien zijn in de ontwikkeling van de natuur, is voor een tweetal natuurgebieden met een extreem begroeiingstype een systeembeschrijving gemaakt (hoofdstuk 4). Dit betreft i) de duingraslanden; een open en droog systeem met een hoge dynamiek en grote extremen en ii) de gesloten hellingbossen in Zuid-Limburg met juist een zeer lage dynamiek.

2 Tijdreeksanalyse bodem- en luchttemperatuur

2.1 Inleiding

Het KNMI meet op vier locaties viermaal per dag de bodemtemperatuur (Figuur 2.1): in De Bilt sinds 1981, in Wilhelminadorp en Marknesse sinds 1989 en in Nieuw Beerta sinds 1990. De verzamelde tijdreeksen kunnen inzicht bieden in de temporele variatie van bodemtemperaturen, de afhankelijkheid van bodemtemperatuur van andere meteorologische variabelen zoals luchttemperatuur en het verloop van bodemtemperatuur met de diepte en trends in bodemtemperatuur. In 2021 zijn de tijdreeksen van deze vier KNMI-stations geanalyseerd (Bakema et al., 2022).



Figuur 2.1 KNMI-en WUR- meetlocatie met bodemtemperatuur.

De vier KNMI-stations liggen alle in agrarisch gebied: Wilhelminadorp, Marknesse en Nieuw Beerta liggen in akkerbouwgebieden, terwijl de omgeving van het station in De Bilt vooral uit grasland bestaat. Bij alle vier de stations is het grondgebruik ter plekke van de sensoren grasland.

Om de onderzoeksvragen uit Bakema et al. (2022) ook te kunnen beantwoorden voor bodems onder natuurgebieden, zijn in 2022 tijdreeksen van bodemtemperatuur geanalyseerd die zijn verzameld bij WUR-meetlocaties De Veenkampen (natte graslanden) en Loobos (naaldbos) (Figuur 2.2). Paragraaf 2.2, 2.3 en 2.4 doen verslag van deze analyses.

Daarnaast is, op basis van de modellering die in 2021 heeft plaatsgevonden (Bakema et al., 2022) en op scenario's voor de ontwikkeling van de luchttemperatuur, een voorspelling gemaakt voor de ontwikkeling van de bodemtemperatuur in De Bilt (paragraaf 2.5). Ten slotte volgen in paragraaf 2.6 enkele conclusies.



Figuur 2.2 Meettoren Loobos <https://www.vanhaminfra.com/projecten/meettoren-kootwijk>.

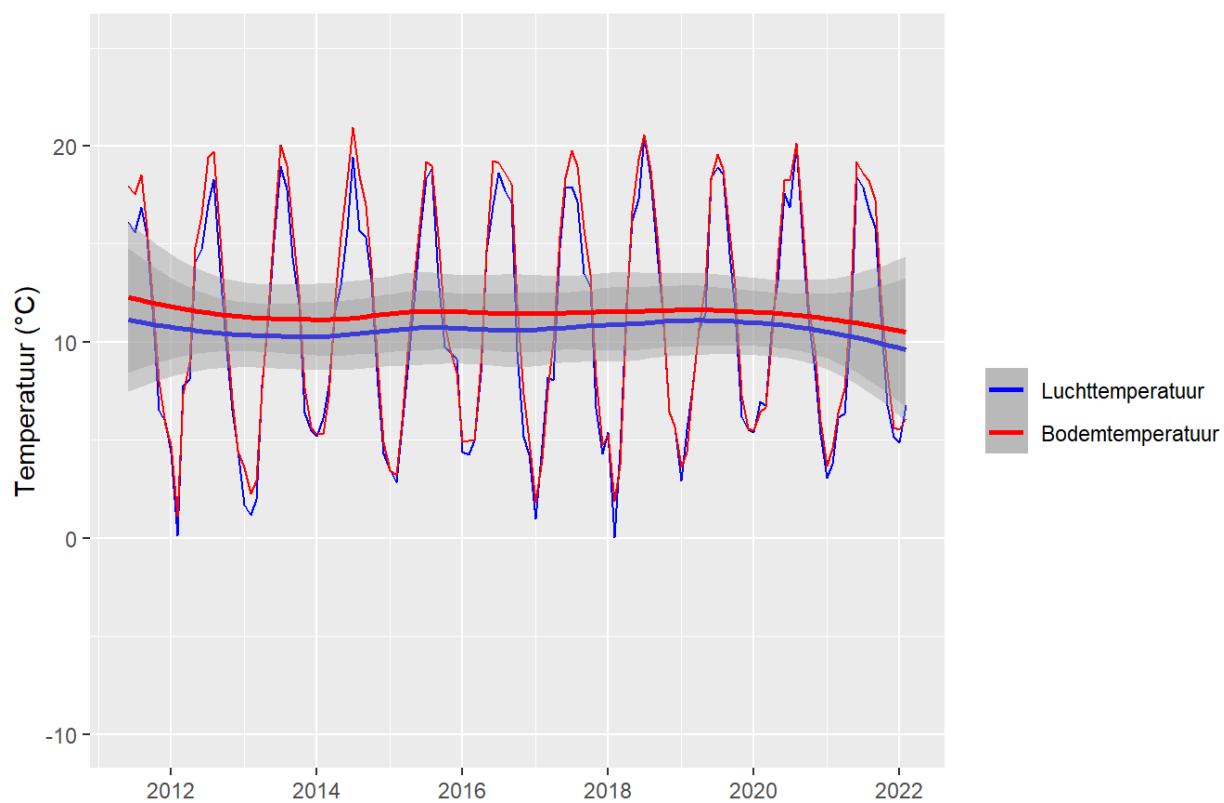
2.2 Exploratieve data-analyse natuurgebieden

2.2.1 Veenkampen

Voor De Veenkampen waren de volgende tijdreeksen beschikbaar (jjjjmmdd):

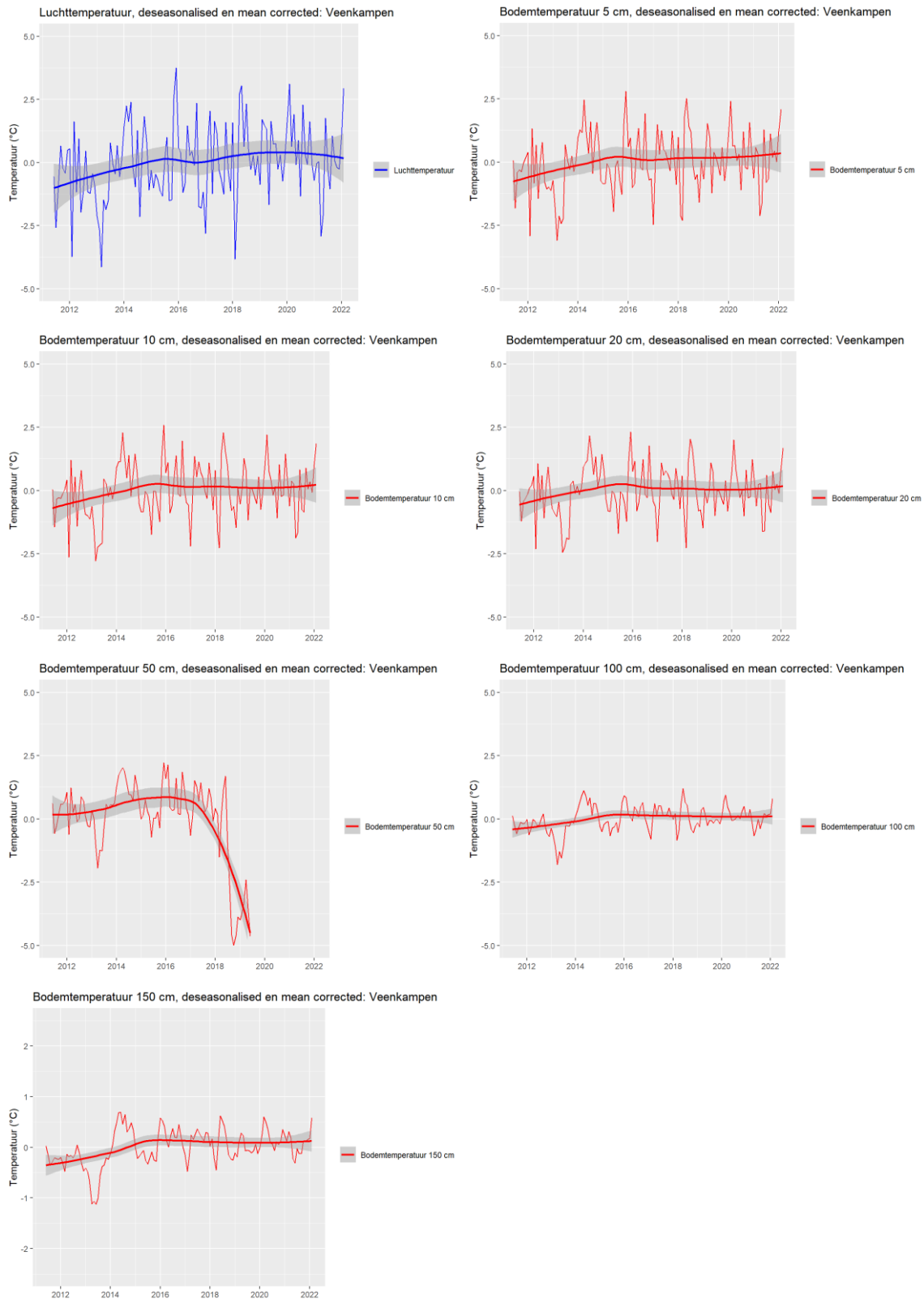
- Luchttemperatuur 150 cm, 20110601-20220207, daggemiddelden;
- Bodemtemperatuur onder gras 5, 10, 20, 50, 100, 150 cm, 20110601-20220207, daggemiddelden (50 cm tot 20190610);
- Bodemtemperatuur onder kale grond 5, 50 cm, 20110601-20220207, daggemiddelden.

De hoogfrequente reeksen die beschikbaar zijn voor De Veenkampen zijn door middeling geaggregeerd tot equidistante maandreeksen. Met een *loes-smoother* is de langjarige trend gevisualiseerd. Dit is gedaan voor de reeks luchttemperaturen en voor de reeksen van bodemtemperaturen die gemeten zijn op 5, 10, 20, 50, 100 en 150 cm. Figuur 2.3 geeft hiervan een voorbeeld voor de bodemtemperaturen op 5 cm diepte. Opgemerkt moet worden dat aan het begin en einde van de reeksen het beeld van de *smoother* minder betrouwbaar is.



Figuur 2.3 Maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen (5 cm diepte onder gras) bij de Veenkampen, trend gevisualiseerd met een loes-smoother.

Vervolgens deseizoenaliseren we de reeksen, door de maandgemiddelden te corrigeren voor de gemiddelden voor de maanden over de jaren heen, zie Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Gedesezoenaliseerde maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen onder gras bij De Veenkampen. De reeks op 50 cm diepte is afgebroken wegens een technisch falen en is in de analyses buiten beschouwing gelaten.

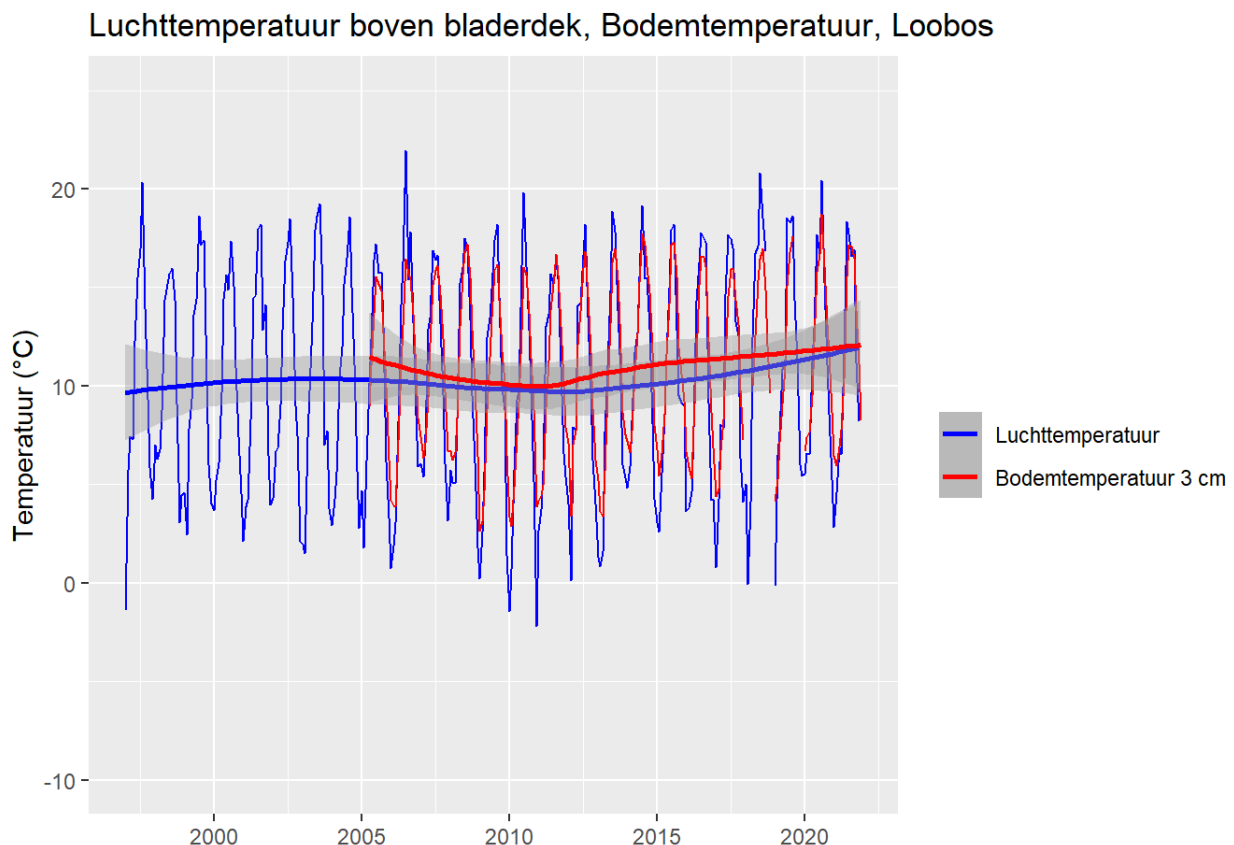
Hieruit blijkt de aanwezigheid van een stijgende trend in lucht- en bodemtemperatuur, die afvlakt vanaf ca. 2015. Verder valt de sterke daling van bodemtemperatuur op 50 cm op. Dit is te wijten aan een storing in de apparatuur en daarom is deze reeks verder buiten beschouwing gelaten.

2.2.2 Loobos

Voor het Loobos waren de volgende tijdreeksen beschikbaar:

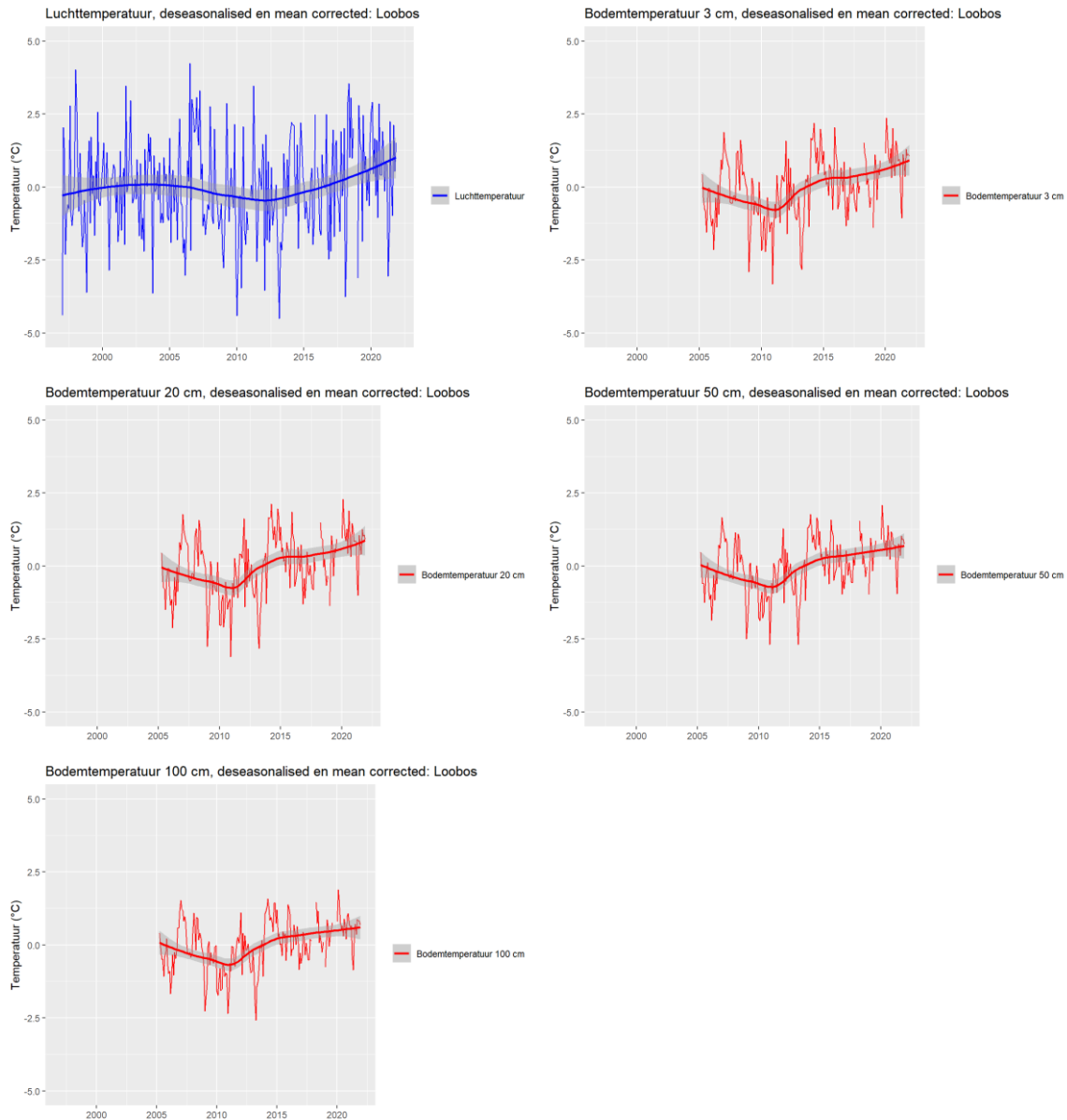
- Luchttemperatuur boven bladerdek, op 23.5 m hoogte, 20050411-20211231, halfuurlijkse waarnemingen;
- Bodemtemperatuur op 3, 20, 50 en 100 cm, 20050411-20211231, halfuurlijkse waarnemingen.

De luchttemperatuur is de temperatuur boven het bladerdek, op 23.5 m hoogte. De bodemtemperaturen vallen uiteen in reeksen die tot begin 2005 zijn gemeten en reeksen die vanaf 2005 zijn gemeten. Van de reeksen die tot begin 2005 zijn gemeten, is niet de diepte bekend waarop is gemeten. Bij de reeksen die vanaf 2005 zijn gemeten, is dat wel het geval: 3 cm, 20 cm, 50 cm en 100 cm. De hoogfrequente reeksen die beschikbaar zijn voor Loobos zijn door middeling geaggregeerd tot equidistante maandreeksen. Met een *loes-smoother* is de langjarige trend gevisualiseerd, zie Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen in het Loobos, trends gevisualiseerd met een *loes-smoother*.

Vervolgens deseizoenaliseren we de reeksen, door de maandgemiddelden te corrigeren voor de gemiddelden voor de maanden over de jaren heen. Figuur 2.6 geeft deze gedeseizoenaliseerde reeksen. De 'gesmoothde' trendlijnen voor lucht- en bodemtemperatuur in Figuur 2.6 laten een daling zien tot circa 2011 en een stijging daarna. Dit soort patronen kunnen samenhangen met persistenties in meteorologische data. Er treden patronen op die zich over meerdere jaren uitstrekken als gevolg van een lang geheugen in het systeem, ook bekend als het Hurst-fenomeen (Hipel en McLeod, 1994). Om langjarige trends te scheiden van dit fenomeen zijn lange tijdreeksen nodig.



Figuur 2.6 Gedesezoenaliseerde maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen in het Loobos.

2.3 Trendanalyse natuurgebieden Veenkampen en Loobos

De gedesezoenaliseerde reeksen zijn gemodelleerd met ARMA-modellen (Hipel en McLeod, 1994) met een externe lineaire trend. Trendanalyse werd uitgevoerd op gedesezoenaliseerde reeksen van maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen. Deze reeksen werden voor het gemiddelde gecorrigeerd. De aldus verkregen reeks y_t met gemiddelde 0 wordt gemodelleerd met het volgende model:

$$y_t = l_t + n_t$$

met

$$l_t = \beta_1 r_t$$

waarin r_t een reeks is van n waarden opklimmend van 1/12 tot en met $n/12$ met correctie voor het gemiddelde, en

$$n_t - c = \phi_1(n_{t-1} - c) + \dots + \phi_p(n_{t-p} - c) + \epsilon_t + \theta_1\epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q\epsilon_{t-q}$$

i.e. een ARMA(p,q)-proces dat de structuur van de ruis beschrijft: het deel van de reeks verschilwaarden dat niet verklaard kan worden uit een lineaire trend. We veronderstellen dat de residuen ϵ_t een i.i.d. reeks te vormen (independently, identically distributed). Dit verifiëren we aan de hand van een tijdreeksgrafiek en het residuele autocorrellogram. Bijlage 3 geeft voor de reeksen van Veenkampen en Loobos een samenvatting van geïdentificeerde modellen.

Tabel 2.1 geeft de lineaire trendparameters weer die zijn gekalibreerd voor de periode juni 2011-februari 2022. Dit is een uitbreiding van Tabel 1 in Bakema et al. (2022).

Tabel 2.1 Lineaire trendparameters van maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen bij vier KNMI-stations, De Veenkampen en Loobos. De luchttemperatuur is bij het Loobos gemeten op 23.5 m hoogte, bij de overige stations op 1.5 m hoogte. De bodemtemperatuur die bij Loobos in de kolom "5 cm" staat is gemeten op 3 cm diepte. Significante stijgingen zijn vet gedrukt (significantieniveau 0.05, eenzijdig alternatief).

Station	begin	eind	trend in °C per jaar (standaardfout)						
			lucht	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	150 cm
260 De Bilt	1981-01	2021-02	0.0405 (0.0089)	0.0402 (0.0085)	0.0402 (0.0076)	0.0420 (0.0076)	0.0438 (0.0077)	0.0424 (0.0066)	
323 Wilhelminadorp	1989-11	2021-02	0.0297 (0.0135)	0.0040 (0.0123)	0.0006 (0.0130)	0.0038 (0.0119)	-0.0013 (0.0113)	-0.0067 (0.0106)	
273 Marknesse	1989-09	2021-02	0.0395 (0.0131)	0.0256 (0.0121)	0.0296 (0.0121)	0.0340 (0.0116)	0.0392 (0.0107)	0.0375 (0.0097)	
286 Nieuw Beerta	1990-01	2021-02	0.0456 (0.0135)	0.0400 (0.0120)	0.0340 (0.0116)	0.0494 (0.0110)		0.0291 (0.0081)	
	1991-10	2021-02	0.0460 (0.0148)				0.0396 (0.0110)		
Veenkampen, gras	2011-06	2022-02	0.1245 (0.0311)	0.0813 (0.0309)	0.0628 (0.0314)	0.0388 (0.0307)		0.0448 (0.0278)	0.0441 (0.0216)
Veenkampen, kale grond	2011-06	2022-02	0.1245 (0.0311)	0.1219 (0.0385)			0.0832 (0.0365)		
Loobos	1997-01	2021-12	0.0233 (0.0162)						
	2005-04	2021-12		0.0758 (0.0348)		0.0723 (0.0371)	0.0666 (0.0317)	0.0595 (0.0250)	

Bij de interpretatie van de resultaten in Tabel 2.1 moet er rekening mee worden gehouden dat de periodes waarop de trendanalyses betrekking hebben, verschillen. De gesmoothde trendlijnen in Figuur 2.3 en Figuur 2.5 laten zien dat de langjarig gemiddelde temperatuur een golvend patroon volgt. Dit verschijnsel wordt persistentie of Hurst-fenomeen genoemd (Hipel en McLeod, 1994) en wordt toegeschreven aan een lang geheugen in een systeem. Afhankelijk van de periode waarop lineaire trendanalyse wordt uitgevoerd, wordt het resultaat ervan beïnvloed door dit verschijnsel.

Vergeleken met eerdere resultaten voor langere reeksen van de stations De Bilt, Wilhelminadorp, Marknesse en Nieuw-Beerta valt op:

1. de lucht- en bodemtemperatuur stijgen gemiddeld gedurende de laatste tien jaar bij De Veenkampen en het Loobos sneller dan gemiddeld gedurende de laatste dertig à veertig jaar bij de vier andere stations;
2. de geschatte parameters voor de lineaire trends lijken te indiceren dat de snelheid waarmee de temperatuur stijgt bij De Veenkampen en het Loobos afneemt met de diepte, terwijl bij de andere stations met reeksen van dertig à veertig jaar lang dit niet het geval lijkt te zijn.

Om de vergelijkbaarheid van de langjarige trends te verbeteren, hebben we voor De Bilt de analyses herhaald vanaf 1 juni 2011. Tabel 2.2 geeft de resultaten.

Tabel 2.2 Lineaire trendparameters van maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen bij KNMI-station 260 De Bilt, vanaf 1 juni 2011.

Reeks 260 De Bilt	Lineaire trend (°C/jaar)	Standaardfout	Tweezijdige p-waarde
Luchttemperatuur 150 cm	0.1303	0.0315	0.0001
Bodemtemperatuur 5 cm onder gras	0.0767	0.0259	0.0038
Bodemtemperatuur 10 cm onder gras	0.0788	0.0287	0.0071
Bodemtemperatuur 20 cm onder gras	0.0666	0.0283	0.0205
Bodemtemperatuur 100 cm onder gras	0.0613	0.0209	0.0041

Vergeleken met De Bilt kunnen we bij De Veenkampen geen trend in bodemtemperatuur onder gras aantonen vanaf 2011 op 20 en 100 cm. Op 5 en 10 cm zijn de trends bij De Veenkampen en De Bilt in de zelfde grootteorde.

Het is voor de reeksen van De Veenkampen niet aangetoond dat de bodemtemperatuur sneller stijgt dan de luchttemperatuur, zowel bij bodem onder gras als onder kale grond. Als de vraag zou zijn geweest: stijgt de bodemtemperatuur minder snel dan de luchttemperatuur (toets met een linkszijdig alternatief), dan zou dat voor de dieptes 5 cm, 10 cm, 20 cm, 100 cm en 150 cm onder gras en voor 50 cm onder kale grond kunnen worden aangetoond bij een significantieniveau van 0.05. Met andere woorden: het is aangetoond dat de bodemtemperatuur minder snel stijgt dan de luchttemperatuur bij een significantieniveau van 0.05. Vergeleken met Tabel 2 in Bakema et al. (2022) vinden we dit ook bij Wilhelminadorp op alle dieptes, bij Marknesse op 5 en 10 cm diepte en bij Nieuw Beerta op 10 en 100 cm diepte. Ook voor het Loobos kon niet worden aangetoond dat de bodemtemperatuur op 3, 20, 50 of 100 cm sneller stijgt dan de luchttemperatuur. Als de vraag zou zijn geweest: stijgt de bodemtemperatuur minder snel dan de luchttemperatuur stijgt (toets met een linkszijdig alternatief), dan zou dit ook niet kunnen worden aangetoond bij een significantieniveau van 0,05.

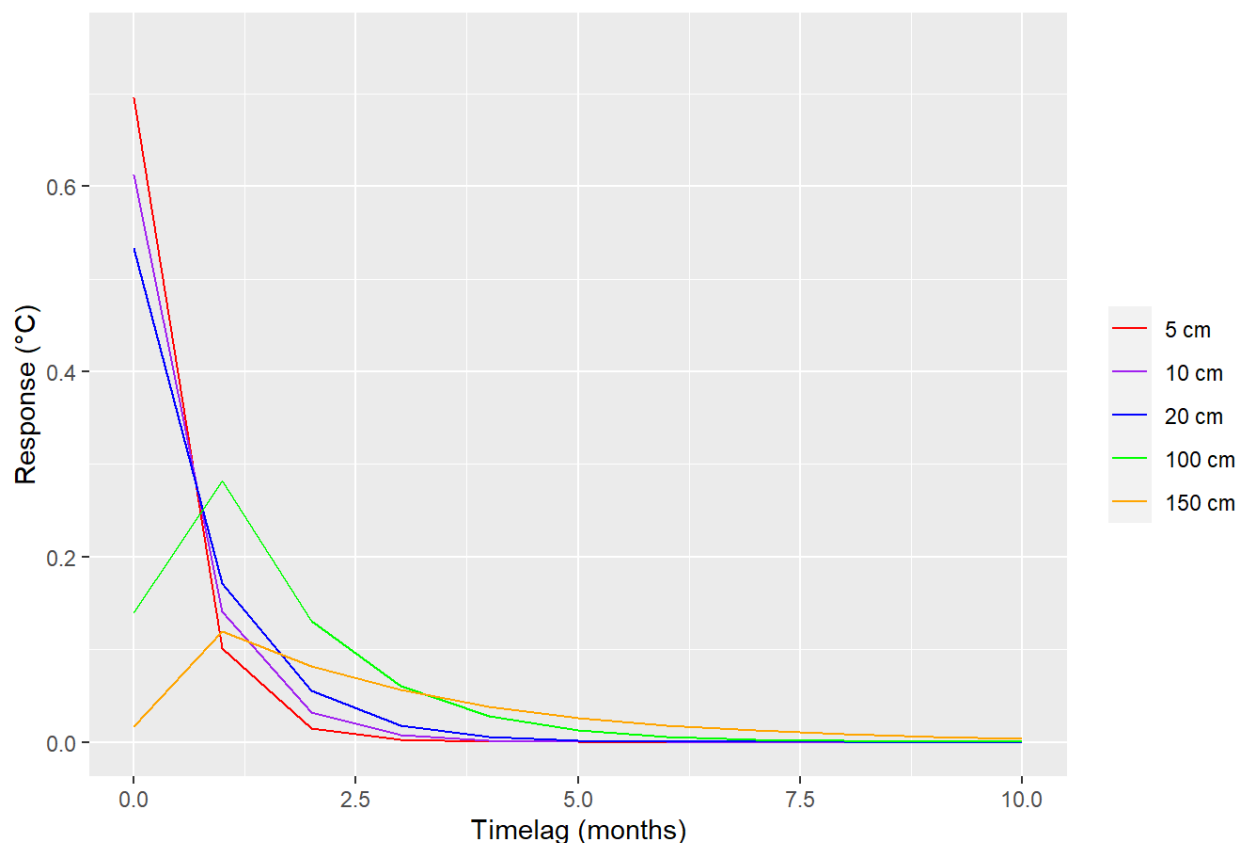
2.4 Relatie luchttemperatuur – bodemtemperatuur

2.4.1 De Veenkampen

De reeksen van De Veenkampen zijn gemodelleerd met transfer-ruismodellen, op dezelfde manier als in Bakema et al. (2022). Tabel 2.3 geeft de geschatte waarden van de parameters die geïdentificeerd zijn voor het transfermodel dat de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur beschrijft. Bijlage 4 geeft de volledige modelspecificaties inclusief standaardfouten van de geschatte parameters. Figuur 2.7 geeft de impuls-responsfuncties behorend bij de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur grafisch weer, voor bodems onder grasland. De impuls-responsfuncties geven inzicht in de reactie van bodemtemperatuur op luchttemperatuur. In vergelijking met de impuls-responsfuncties die voor de vier stations in Bakema et al. (2022) zijn gevonden, is de relatief trage respons op 100 cm en 150 cm bij De Veenkampen opmerkelijk.

Tabel 2.3 Parameters van het transfermodel voor de relatie tussen luchttemperatuur en bodemtemperatuur onder gras in De Veenkampen.

parameter	diepte (cm)				
	5	10	20	100	150
δ_1	0.1455565	0.2303414	0.3216048	0.46501097	0.68506691
$\hat{\omega}_0$	0.6959006	0.6120235	0.5334781	0.13982625	0.01680786
$\hat{\omega}_1$	0	0	0	0.21694462	0.10767406

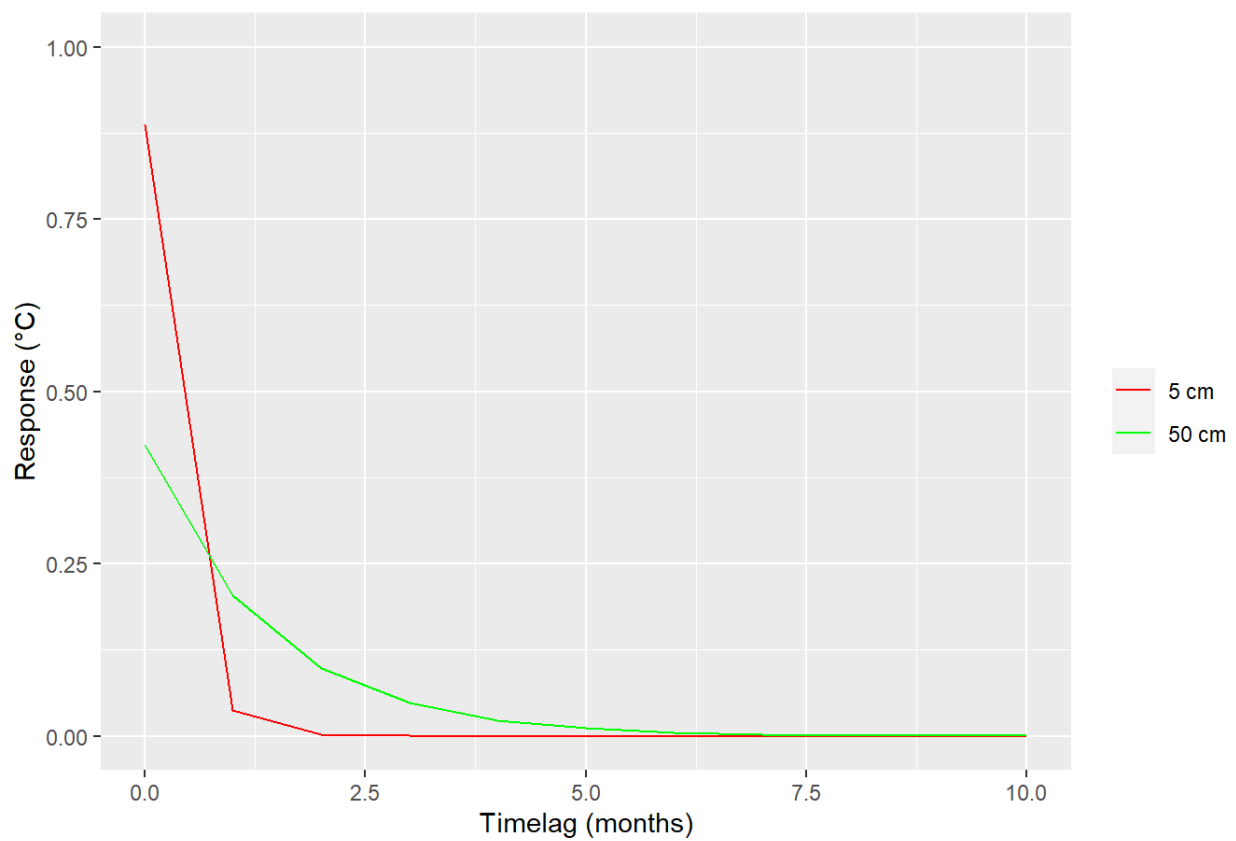


Figuur 2.7 Impuls-responsfuncties voor de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur onder grasland bij De Veenkampen.

Figuur 2.8 geeft de lineaire respons van bodem- op luchttemperatuur voor bodem onder kale grond. Hierbij valt op dat de bodemtemperatuur op een diepte van 5 cm anders reageert op luchttemperatuur dan bij bodem onder gras: de bodemtemperatuur verandert sterker, maar de verandering is sneller uitgedempt omdat het geheugen korter is (de rode lijn daalt steiler). De bijbehorende parameterwaarden staan in Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Parameters voor het transfermodel dat de relatie tussen luchttemperatuur en bodemtemperatuur onder kale grond beschrijft, De Veenkampen.

parameter	diepte (cm)	
	5	50
δ_1	0.04215216	0.4828471
$\hat{\omega}_0$	0.88660127	0.4220636

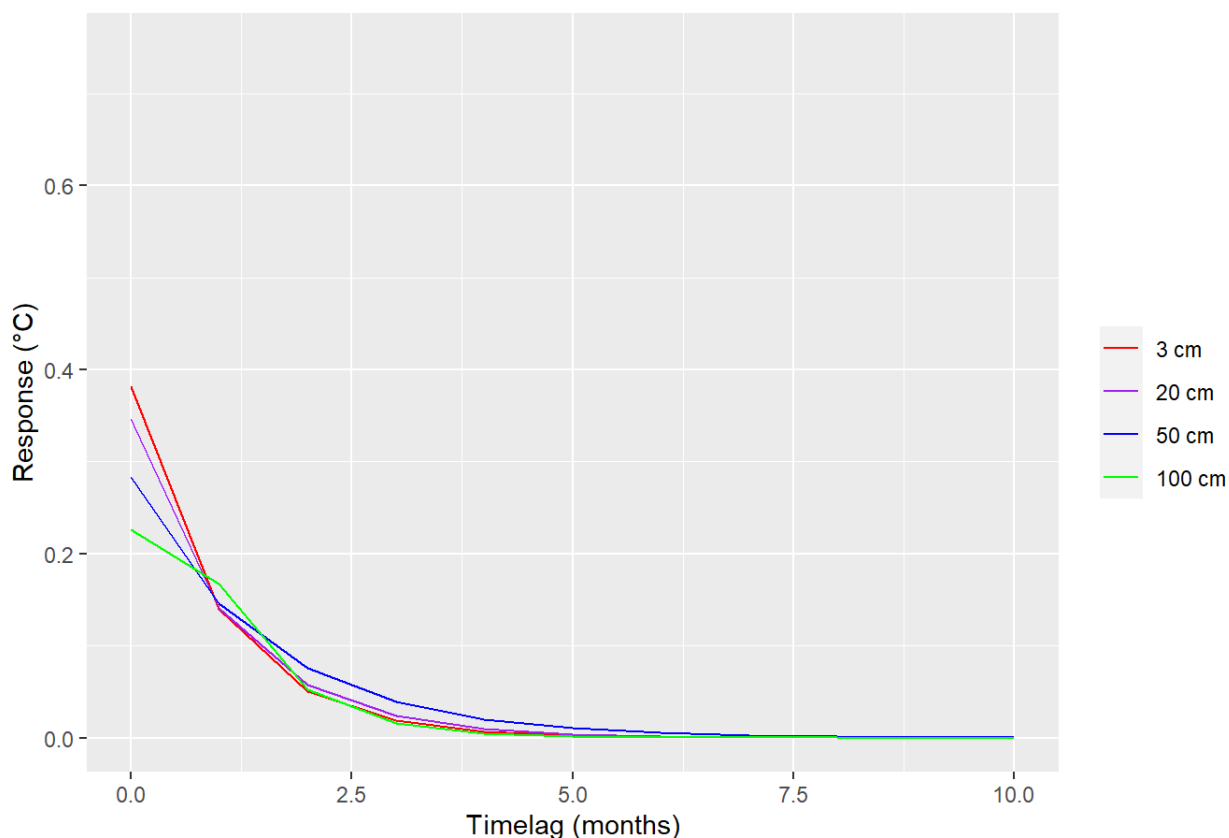


Figuur 2.8 Impuls-responsfuncties voor de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur onder kale grond bij de Veenkampen.

2.4.2 Loobos

De reeksen van Loobos zijn gemodelleerd met transfer-ruismodellen, op dezelfde manier als in Bakema et al. (2022). De impuls-responsfuncties in Figuur 2.9 geven inzicht in de reactie van bodemtemperatuur op luchttemperatuur.

Resonse of soil temperatures at four depths to Air Temperature, Loobos



Figuur 2.9 Impuls-responsfuncties voor de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur in het Loobos.

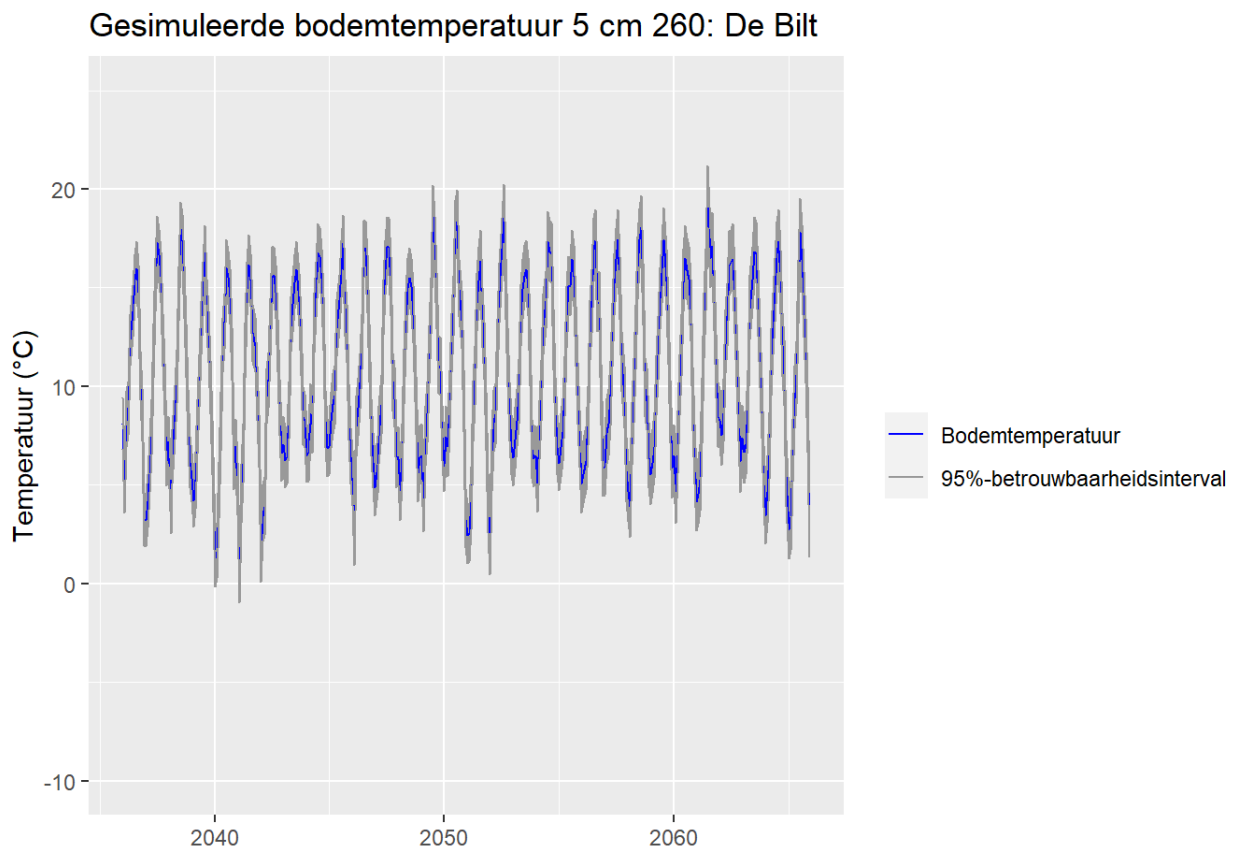
Tabel 2.5 geeft de parameterwaarden van de transfermodellen die behoren bij de impuls-responsfuncties in Figuur 2.9. Het transfermodel beschrijft de relatie tussen luchttemperatuur en bodemtemperatuur in Loobos. Bijlage 4 geeft alle parameterwaarden van de transfer-ruismodellen en hun standaardfouten.

Tabel 2.5 Parameterwaarden voor het transfermodel dat de relatie tussen luchttemperatuur en bodemtemperatuur beschrijft, Loobos.

parameter	diepte (cm)			
	3	20	50	100
δ_1	0.3648	0.4082	0.5171	0.3108
$\hat{\omega}_0$	0.3820	0.3459	0.2829	0.2265
$\hat{\omega}_1$	0	0	0	0.0968

2.5 Ontwikkeling bodemtemperatuur De Bilt

Met het transfer-ruismodel dat de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur beschrijft voor de periode januari 1980-februari 2021 is een voorspelling gemaakt van de ontwikkeling van de toekomstige bodemtemperatuur onder KNMI-scenario WH 2050. Deze simulatie is een lineaire transformatie van de luchttemperatuurreeks behorende bij KNMI-scenario WH 2050 in een bodemtemperatuurreeks. Deze lineaire relatie is beschreven met een transfer-ruismodel dat gekalibreerd is op de data uit de periode 1980-2020. Figuur 2.10 geeft de gesimuleerde reeks weer voor de bodemtemperatuur op 5 cm diepte bij KNMI-station De Bilt. Opgemerkt moet worden dat het 95%-betrouwbaarheidsinterval uitsluitend de nauwkeurigheid van de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur reflecteert, niet die van het KNMI-scenario 2050.



Figuur 2.10 Gesimuleerde bodemtemperatuur op 5 cm diepte bij KNMI-station 260 De Bilt, bij ontwikkeling van de luchttemperatuur volgens KNMI-scenario WH 2050, veronderstellende dat de lineaire relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur die voor de periode 1980-2020 is vastgesteld ongewijzigd blijft. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval geeft de nauwkeurigheid van deze relatie weer, niet die van het KNMI-scenario WH 2050.

2.6 Conclusies tijdreeksanalyses

Uit de analyses die in dit hoofdstuk zijn beschreven, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen bij De Veenkampen stijgen tussen medio 2011 en 2016, waarna de trend afvlakt (Figuur 2.3). Bij het Loobos zien we een daling tussen 2005 en 2010 en daarna stijging (Figuur 2.5). Op verschillende dieptes is bij zowel De Veenkampen als Loobos een stijgende lineaire trend aangetoond bij een significantieniveau van 0,05 (Tabel 2.2 en Tabel 2.3), zoals deze ook zijn aangetoond voor de reeksen van KNMI-stations in Bakema et al. (2022). Geconcludeerd kan worden dat voor de verschillende stations en waarnemingsperioden een lineaire stijging van temperatuur kan worden aangetoond in luchttemperatuur en bodemtemperatuur op verschillende dieptes, bij een significantieniveau van 0,05, maar dat de magnitudes van deze stijgingen kunnen verschillen. Dit kan worden verklaard door de effecten van persistenties als gevolg van een lang geheugen (Hurst-fenomeen), die niet geheel gescheiden kunnen worden van een langjarige lineaire trend. Daardoor kunnen verschillende lineaire trendcoëfficiënten voor reeksen uit verschillende perioden worden geschat en kunnen 'gesmoothde' tijdreeksen ook periodiek dalingen of constante, gemiddelde temperaturen laten zien.
- Voor De Veenkampen en Loobos kon niet worden aangetoond bij een significantieniveau van 0,05 dat de bodemtemperatuur sneller stijgt dan de luchttemperatuur.
- Bij De Veenkampen is bodemtemperatuur gemeten onder zowel gras als kale grond. Onder kale grond reageert de bodemtemperatuur op een diepte van 5 cm anders op luchttemperatuur dan bij bodem onder gras: de bodemtemperatuur verandert sterker, maar de verandering is sneller uitgedempt, omdat het geheugen korter is.
- De bodemtemperatuur zal in 2050 met 2.7°C zijn gestegen ten opzichte van 1980.

3 Ontwikkeling bodemtemperaturen bij verschillende bodembedekkingen

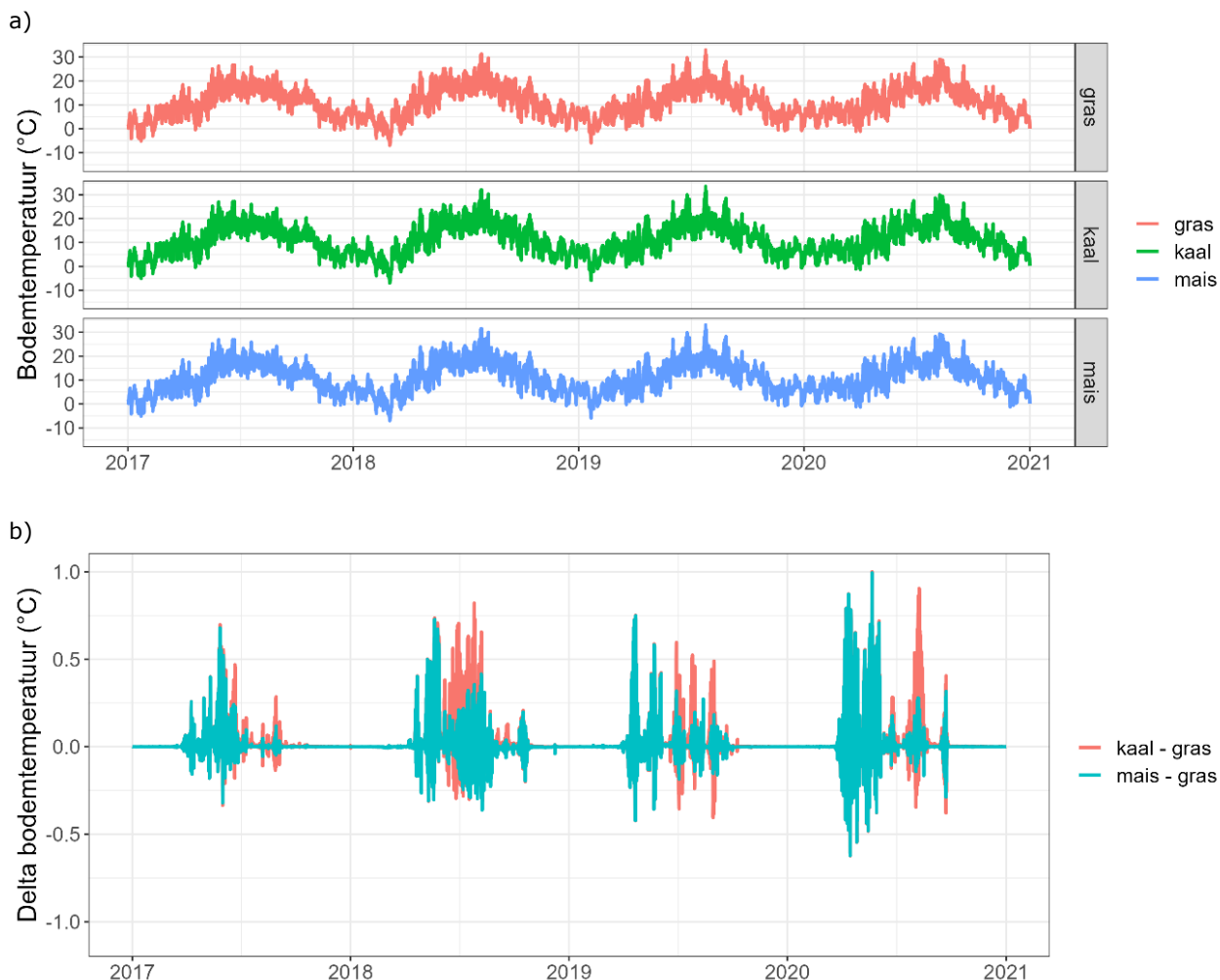
3.1 Inleiding en aanpak

In 2021 zijn SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017; swap.wur.nl) simulaties uitgevoerd om de bodemtemperatuur voor KNMI locatie De Bilt (Bakema et al., 2022; deelrapport 1, sectie 5). De resultaten voor verschillende bodembedptes zijn destijds alleen beschreven in termen van trends over dertig jaar en hoe die zich verhouden tot de gemeten trends. Het doel van dit vervolgonderzoek was om na te gaan of de ontwikkeling van bodemtemperatuur afhankelijk is van het type gewas, inclusief braakligging. In eerste instantie is uitgegaan van de standaardmanier waarop bodemtemperatuur in SWAP-WOFOST wordt beschouwd (Kroes et al., 2017). Lopende dit onderzoek is het concept iets uitgebreid door een ander type bovenrandvoorwaarde voor simuleren van bodemtemperatuur in SWAP-WOFOST toe te voegen.

Bodemtemperatuur wordt in SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017; swap.wur.nl) gemodelleerd door een op diffusie gebaseerde warmtebalansvergelijking. Deze differentiaalvergelijking kan worden opgelost wanneer, naast een uitgangssituatie, ook de randvoorwaarden aan de onder- en bovenzijde (als functie van de tijd) zijn gegeven. Aan de onderzijde, op grotere diepte, wordt meestal een constante temperatuur of eventueel een nul-gradiënt in bodemtemperatuur verondersteld. In SWAP-WOFOST (versie 4.2.0) wordt verondersteld dat aan maaiveld een bekende temperatuur heerst gelijk aan de gemiddelde dagtemperatuur in de atmosfeer of gelijk aan een opgegeven (gemeten) temperatuurreeks. In paragraaf 3.2 zal met deze aanpak gekeken worden naar het verloop van de bodemtemperatuur voor gras, mais en braak. Vervolgens zal in paragraaf 3.3 ingegaan worden op een aanpassing in de SWAP-WOFOST bovenrandvoorwaarde voor bodemtemperatuur en hoe dat doorwerkt in het gesimuleerde verloop van de bodemtemperatuur bij een volledig begroeide situatie (gras) en een volledig onbegroeide situatie (braak).

3.2 Modelonderzoek: opgelegde bodemtemperatuur aan maaiveld

Voor locatie De Bilt zijn drie simulaties uitgevoerd waarbij de bodembedekking is gevarieerd: gras, mais of kaal. Als bovenrand voor de bodemtemperatuur zijn de uurlijks gemeten luchttemperaturen gebruikt. Uit de resultaten volgt dat er nauwelijks verschil is in gesimuleerde bodemtemperaturen voor de drie bodembedekkingen (Figuur 3.1a). De verschillen (Figuur 3.1b) zijn zeer gering, in absolute zin minder dan 1°C. De verschillen zijn het gevolg van de verschillen in bodemvochtcondities die bepalen hoe groot de warmtegeleidingsvariabelen zijn. Met de huidige implementatie van bodemtemperatuur-randvoorwaarde aan maaiveld wordt weinig verschil in dynamiek van de bodemtemperatuur waargenomen. Dat lijkt niet aannemelijk. We weten immers dat op warme zomerdagen het geen probleem is om op blote voeten op een grasveld te lopen, maar dat lopen op het droge zandstrand soms pijnlijk aanvoelt. Je zou dus verwachten dat, zeker voor braaksituaties, de dynamiek van de bodemtemperatuur groter moet zijn dan voor begroeide situaties.



Figuur 3.1 a) Gesimuleerde bodemtemperatuur op 5 cm diepte onder gras, mais en kaal voor locatie De Bilt voor de jaren 2017-2021, en b) de verschillen in bodemtemperatuur voor de situaties mais en kaal ten opzichte van gras.

3.3 Modelonderzoek: opgelegde warmteflux aan maaiveld

Gemeten luchttemperaturen boven begroeide en onbegroeide situaties zullen mogelijk niet veel verschillen. Wat wel verschilt, is de directe instraling aan maaiveld voor begroeide versus kale bodems. De vraag is dus of de bovenrandvoorwaarde voor simuleren van bodemtemperaturen hiertoe moet worden aangepast.

Allereerst is een quickscan in de literatuur uitgevoerd waarbij is gekeken hoe andere simulatiemodellen omgaan met de bovenrandvoorwaarde voor bodemtemperatuur. In Bijlage 1 is terug te lezen hoe dat plaatsvindt in de modellen COUP, DAISY, APSIM en Hydrus, aangevuld met beschrijvingen van De Bruin & Holtslag (1982), Te Berge (1986; 1990), Chung & Horton (1987) en Van der Linden et al. (2022). Uit deze quickscan in de literatuur is duidelijk geworden dat er geen eenduidige manier wordt gehanteerd om de bovenrandvoorwaarde voor warmtetransport in de bodem te kwantificeren. Om toch een indruk te krijgen wat de impact is van verschillende warmtefluxen aan de bovenzijde op het verloop van de bodemtemperatuur, is in dit onderzoek gekozen om het concept van De Bruin & Holtslag (1982) nader te beschouwen.

Uitgangspunt van de analyse in de Bruin & Holtslag (1982; zie ook Holtslag et al., 1981) is de algemene warmtebalans gegeven door

$$R_n + H + LE + G = 0 \quad (3-1)$$

hierin is

R_n	de instraling (W m^{-2})
H	voelbare warmteflux (W m^{-2})
LE	latente warmteflux (W m^{-2})
G	warmteflux aan maaiveld (W m^{-2})

In de Bruin & Holtslag (1982) wordt een eenvoudig model gepresenteerd om de warmteflux G (W m^{-2}) aan maaiveld te schatten. Er wordt gesteld dat deze warmteflux gelijk is aan een fractie van de netto-straling Q^* (W m^{-2}) volgens

$$G = c_G Q^* \quad (3-2)$$

Op basis van metingen stellen zij dat c_G gelijk is aan 0.1 voor 10 cm hoog gras. Volgens Moene & Van Dam (2014) is c_G iets lager voor hogere gewassen zoals mais en granen (bijv. 0.07) en is c_G in de range 0.1-0.5 voor gedeeltelijk bedekte grond. Wel moet worden opgemerkt dat De Bruin & Holtslag (1982) deze factor hebben afgeleid alleen voor perioden tussen zonsopkomst en zonsondergang. In het vervolg gaan we er echter van uit dat dit voor de volledige dag geldt.

In hun bijlage geven de Bruin en Holtslag (1982) eenvoudige relaties om Q^* te berekenen op basis van de gemeten kortegolfstraling, luchttemperatuur en bewolkingsgraad. De netto-straling Q^* is gegeven als

$$Q^* = (1 - A)K^+ + L^+ - L^- \quad (3-3)$$

hierin is

A	albedo van het grondoppervlak; bijvoorbeeld 0.25 voor kort gras
K^+	inkomende kortegolfstraling (W m^{-2})
L^+	inkomende langegolfstraling (W m^{-2})
L^-	uitgaande langegolfstraling (W m^{-2})

Moene & Van Dam (2014) geven voor bodems waarden voor de albedo A in de range 0.1-0.4: donkere natte bodems: 0.1; nat zand: 0.1-0.25; droog zand: 0.2-0.4; natte klei: 0.1-0.2; droge klei: 0.2-0.35.

De inkomende kortegolfstraling, K^+ , wordt door weerstations gemeten.

Voor L^+ geldt:

$$L^+ = 5.31 \cdot 10^{-13} (273 + T)^6 + 60N \quad (3-4)$$

hierin is

T	luchttemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
N	bewolkingsgraad (0..1)

Voor L^- geldt:

$$L^- = \sigma(273 + T)^4 + c(1 - A)K^+ \quad (3-5)$$

hierin is

σ	constante van Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
N	bewolkingsgraad (0..1)
c	een constante met voorgestelde waarde van $c = 0.07$

Voor een met kort gras begroeide situatie geldt dat $A = 0.25$ en $c_G = 0.1$. Voor een volledig kale bodem (bijv. droog zand) geldt dat de albedo in de range 0.2-0.4 ligt (bij benadering $A = 0.25$) en zouden we c_G kunnen stellen op 0.5. In dat geval zal de warmteflux voor kale bodem dus 5x groter zijn dan voor grasland.

In het kader van dit onderzoek is in SWAP de mogelijkheid ingebouwd om aan de bovenzijde van de bodemkolom (maaiveld) een opgelegde warmteflux te hanteren (als alternatief voor opgelegde temperatuur). De warmteflux aan maaiveld als functie van de tijd dient als voorberekende tabel bij de invoer te worden opgegeven. In Bijlage 2 is kort aangegeven wat de belangrijkste toevoeging in de SWAP-code is geweest om een warmteflux als bovenrandvoorwaarde te kunnen beschouwen.

3.4 Modelleren warmteflux en bodemtemperatuur

In het voorbeeld in deze paragraaf is uitgegaan van uurlijkse meetgegevens van KNMI-station De Bilt. De warmteflux aan maaiveld is berekend met vergelijkingen (3-2)-(3-5) voor verschillende waarden van de factor c_G : 0.1 voor gras, en 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 voor (deels) onbegroeide grond (cf. Moene & Van Dam, 2014). Simulaties zijn ook uitgevoerd voor een bovenrandvoorwaarde met opgelegde temperatuur (ofwel de gemiddelde dagtemperatuur van de lucht (op 1.5 m) ofwel de uurlijks gemeten luchttemperatuur).

In Figuur 3.2 zijn de gemeten 6-uurlijkse bodemtemperaturen op vijf dieptes (5, 10, 20, 50, 100 cm -mv) (rood) vergeleken met de gesimuleerde 6-uurlijkse bodemtemperaturen (blauw) voor a) opgelegde bodemtemperatuur aan maaiveld gelijk aan gemiddelde dagtemperatuur van de lucht, b) opgelegde bodemtemperatuur aan maaiveld gelijk aan gemeten uurlijkse temperatuur van de lucht, en c) opgelegde warmteflux aan maaiveld. Duidelijk valt op dat voor situatie c (opgelegde warmteflux) de gesimuleerde bodemtemperaturen veel minder hoogfrequente variatie vertonen. Voor alle drie de situaties geldt dat de simulaties behoorlijk overeenkomen met de metingen. In Tabel 3.1 zijn enkele vergelijkende statistieken gegeven: *mean absolute error* (MAE), *root mean squared error* (RMSE), de Pearson correlatiecoëfficiënt (r), en de Nash-Sutcliffe *modeling efficiency* (NSE).

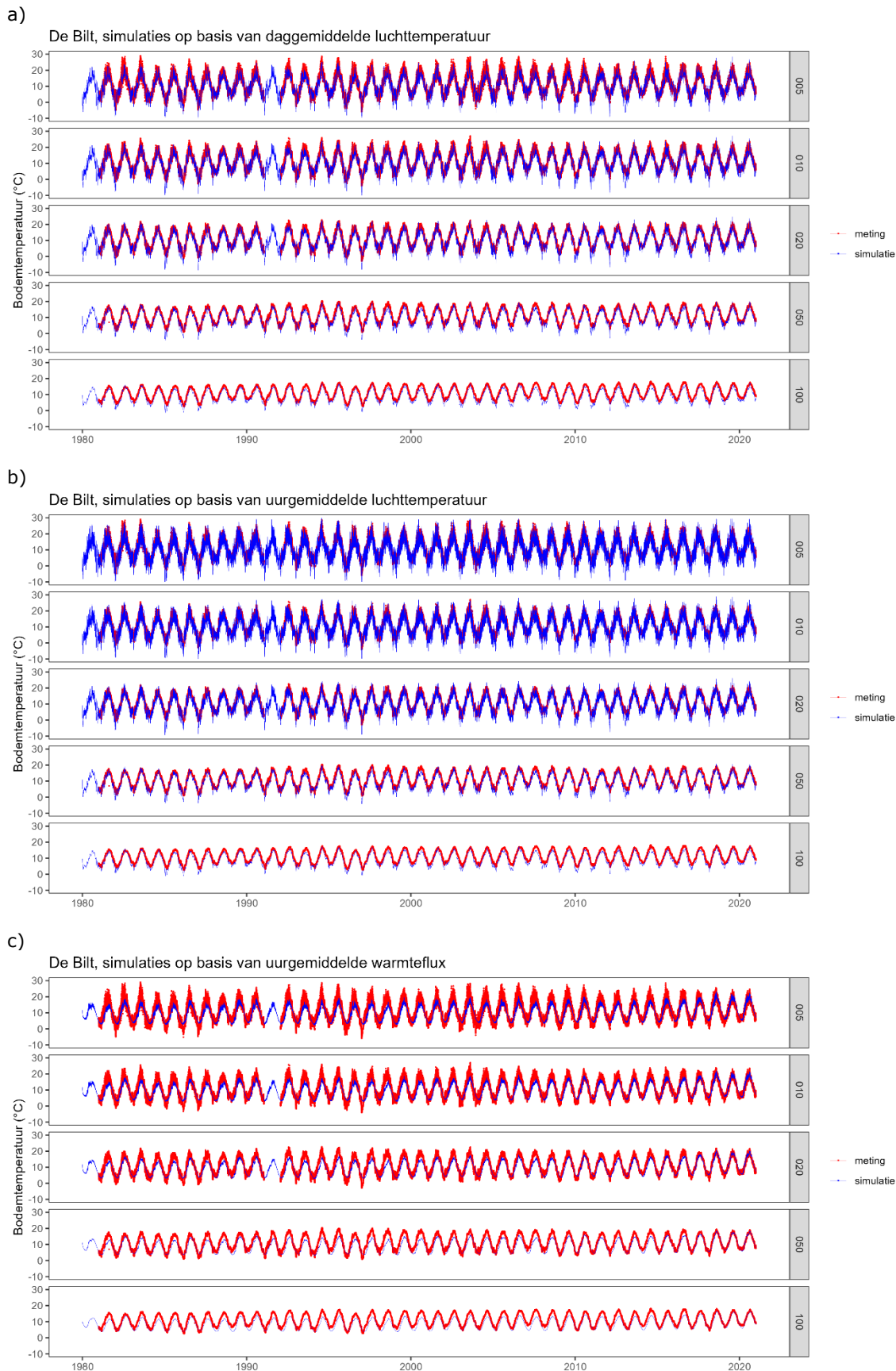
De afwijkingen tussen gemeten en gesimuleerde bodemtemperaturen in termen van deze statistieken zijn iets groter voor de situatie waarbij de warmteflux als bovenrandvoorwaarde is gebruikt. De MAE ligt dan in de range 2.3-2.6°C, terwijl die voor de situaties met opgelegde bovenrand temperatuur in de range 1.5-1.9°C ligt. Op basis van deze statistieken blijkt dat de grootste overeenkomst (kleinste waarden voor MAE, RMSE en grootste waarden voor r en NSE) worden verkregen voor uurlijks gemeten luchttemperatuur gevolgd door daggemiddelde luchttemperatuur. Indien de netto-straling als bovenrandvoorwaarde wordt beschouwd, dan is de overeenkomst iets minder goed. Echter, die randvoorwaarde geeft wel de mogelijkheid om de instraling een functie van de bedekkingsgraad te laten zijn.

De invloed van de waarde voor c_G is vrij groot, zoals te zien in Figuur 3.3. Indien $c_G = 0.5$ gezien wordt als de waarde te gebruiken voor een volledig kale grond, dan leidt dit tot hoge warmtefluxen en dus hoge bodemtemperaturen, oplopend tot bijna 100°C. Dat lijkt te extreem, en dus moet c_G voorzichtig gekozen worden. De invloed van c_G is met name in de zomer heel duidelijk zichtbaar, terwijl in de winterperiode de bodemtemperaturen veel minder beïnvloed worden door de waarde van c_G .

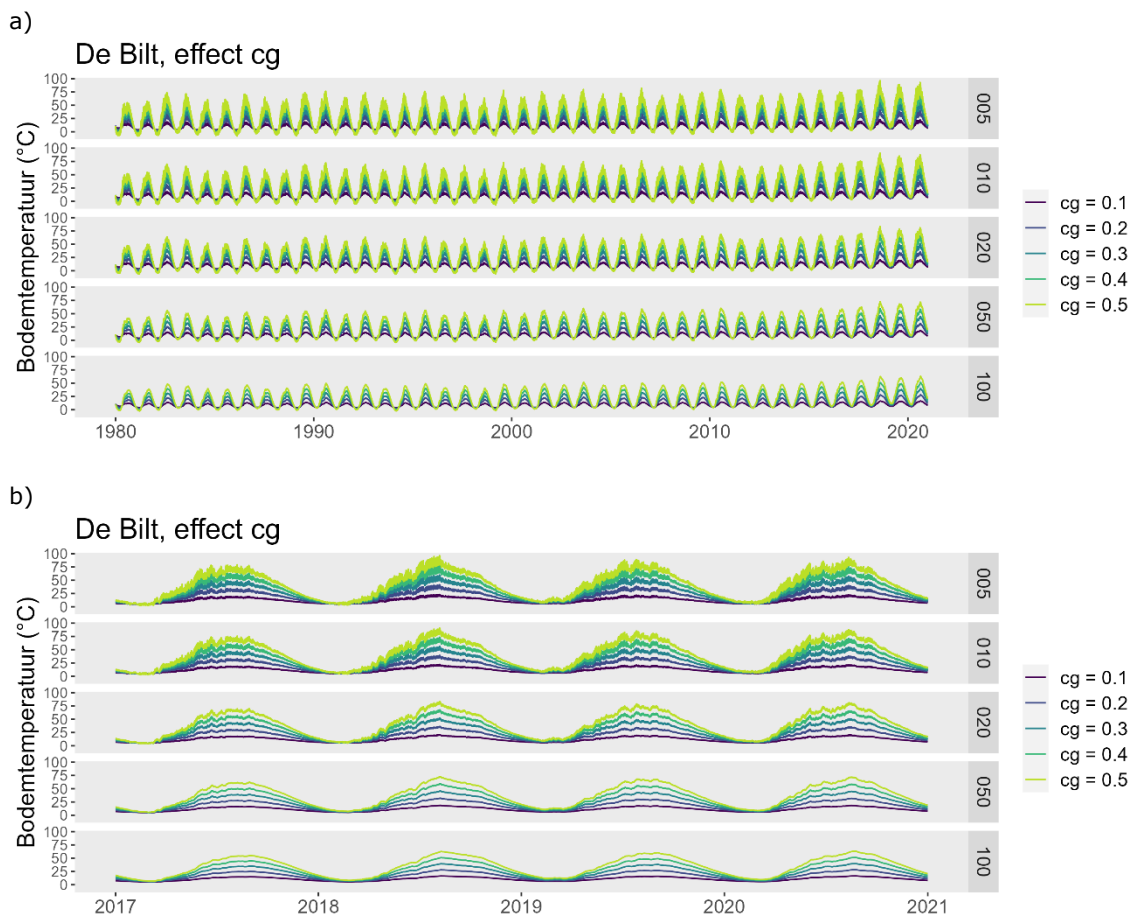
Het eenvoudige concept om de warmteflux aan maaiveld in te schatten dat hier is gehanteerd, is zeker niet de perfecte oplossing. Toch is het goed vast te stellen dat voor een met gras begroeide situatie de gesimuleerde bodemtemperaturen vrij goed overeenstemmen met de gemeten bodemtemperaturen. Niet alle kleine details worden goed voorspeld, maar de seizoenale en jaarlijkse trends zijn wel goed gesimuleerd. Door te variëren met de waarde c_G kan de warmteflux aan maaiveld vergroot of verlaagd worden. Hiermee kan exploratief nagegaan worden hoe de bodemtemperaturen van deels begroeide grond zich zal gedragen.

Tabel 3.1 De overeenkomsten tussen gemeten en gesimuleerde bodemtemperaturen op vijf dieptes voor de locatie De Bilt (gras) voor drie beschouwde bovenrandvoorwaarden: daggemiddelde luchttemperatuur, uurlijks gemeten luchttemperatuur en uurlijks geschatte netto instraling uitgedrukt in de statistieken mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE), de Pearson-correlatiecoëfficiënt (r), en de Nash-Sutcliffe modeling efficiency (NSE).

Bovenrand	Diepte	MAE	RMSE	r	NSE
T, daggemiddelde	5	1.925	2.455	0.934	0.842
	10	1.699	2.127	0.951	0.863
	20	1.514	1.867	0.964	0.878
	50	1.666	1.907	0.977	0.829
	100	1.913	2.050	0.982	0.711
T, uurlijks	5	1.804	2.269	0.946	0.865
	10	1.701	2.126	0.950	0.864
	20	1.496	1.852	0.962	0.880
	50	1.592	1.839	0.977	0.841
	100	1.837	1.981	0.982	0.730
Q, uurlijkse netto instraling	5	2.601	3.211	0.901	0.729
	10	2.409	2.907	0.916	0.745
	20	2.264	2.712	0.922	0.743
	50	2.277	2.693	0.929	0.659
	100	2.307	2.595	0.946	0.537



Figuur 3.2 Tijdreeksen van gemeten en gesimuleerde bodemtemperaturen op vijf dieptes voor locatie De Bilt (gras) voor drie verschillende type bovenrandvoorwaarden: a) daggemiddelde luchttemperatuur, b) uurlijkse luchttemperatuur, uurlijkse netto-straling.



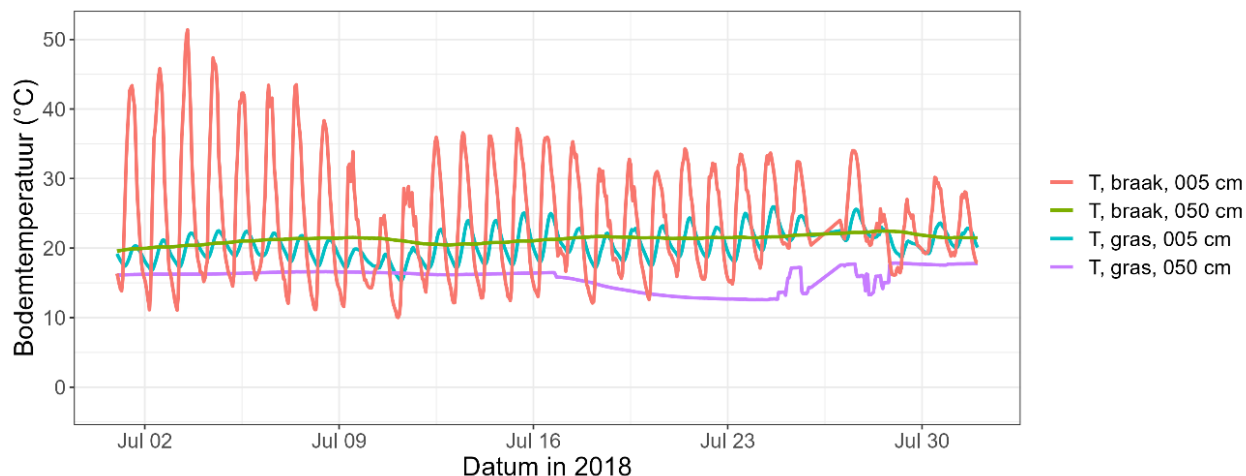
Figuur 3.3 Gesimuleerde bodemtemperatuur indien de netto-straling als bovenrandvoorwaarde wordt beschouwd voor vijf waarden van de parameter c_g : voor periode a) 1980-2021 en b) 2017-2020.

3.5 Bodemtemperatuur en warmteflux bij gras en kale bodem voor locatie De Veenkampen

Op de locatie De Veenkampen worden diverse meteorologische variabelen gemeten (beschikbaar via: <https://veenkampen.nl/data/>). Er worden bodemtemperaturen gemeten alsook warmtefluxen in de bodem. De Veenkampen ligt in het Binnenveld en volgens de Bodemkaart¹ betreft het een koopveengrond op zand (hVz; BOFEK2020-eenheid 1017 (Heinen et al., 2021)); de lokaal gemeten grondwaterspiegeldiepte in de periode medio 2011 tot medio 2022 ligt tussen 20 cm en 100 cm beneden maaiveld.

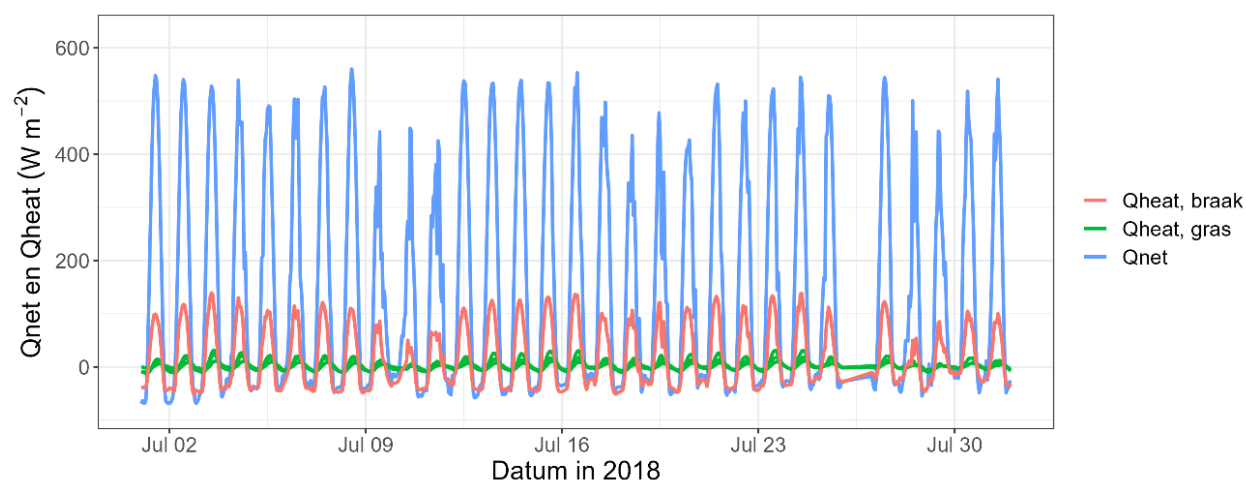
In Figuur 3.4 is de gemeten bodemtemperatuur onder gras (blauw) en in kale bodem (rood) weergegeven voor de maand juli in 2018 voor dieptes 5 cm en 50 cm. Duidelijk is het verschil in gedrag zichtbaar tussen een begroeide plot en een onbegroeide plot op 5 cm diepte. In de kale bodem kan de bodemtemperatuur op 5 cm diepte tot iets boven de 50°C oplopen.

¹ <https://www.pdok.nl/-/de-bodemkaart-van-nederland-beschikbaar-bij-pdok>



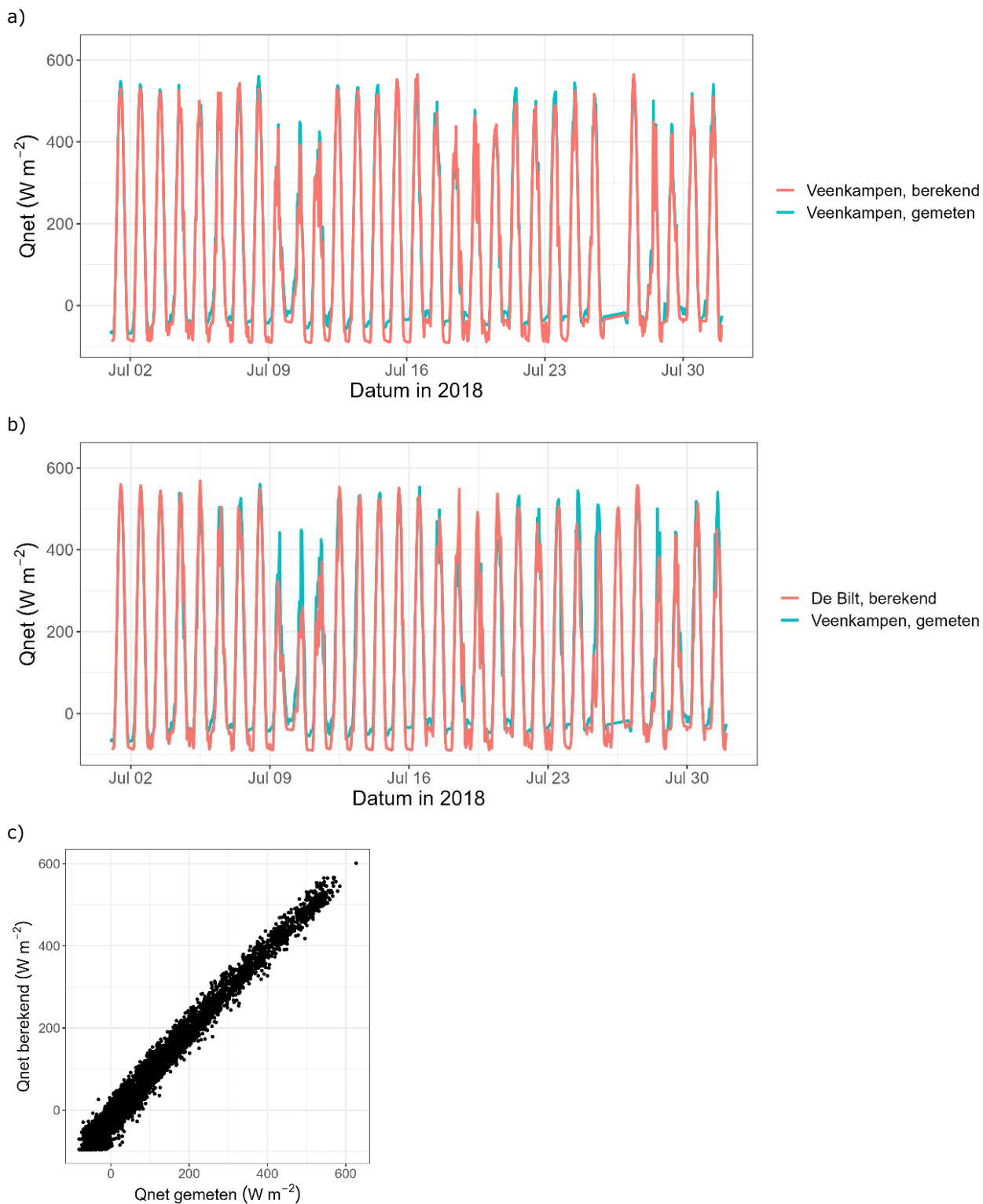
Figuur 3.4 Gemeten bodemtemperatuur op twee dieptes (5 en 50 cm) onder gras en onder braak op locatie De Veenkampen in juli 2018.

In Figuur 3.5 zijn de gemeten warmtefluxen op 6 cm onder maaiveld gegeven voor een met gras begroeide plot (groen; in drievoud) en voor een plot zonder begroeiing (rood; kale bodem); daarbij is ook de netto-straling geplot (blauw). Overdag is er duidelijk meer warmte-input in de kale bodem dan in een met gras begroeide situatie. In de nacht laat de kale bodem op 6 cm diepte vaak een uitstraling zien vrijwel gelijk aan de netto uitstraling; dat geldt vooral in de zomer, maar in de winter is de uitstraling in de nacht geringer dan de netto uitstraling. De netto-straling wordt gemeten/afgeleid van stralingsmetingen onafhankelijk van de begroeiing. Er is dus geen informatie bekend of deze verschillend is voor de met gras begroeide situatie en voor de kale grond-situatie.



Figuur 3.5 Berekende netto-straling aan maaiveld (Q_{net}) en gemeten warmtefluxen (Q_{heat}) op 6 cm diepte onder gras (in drievoud) en onder braak (enkelvoud) op locatie De Veenkampen in juli 2018.

In Figuur 3.6 is de gemeten netto-straling van de Veenkampen vergeleken met de berekende (zie paragraaf 3.3) netto-straling voor locaties De Veenkampen en De Bilt. De overeenkomst overdag is zeer groot. De zichtbare verschillen zijn zeer waarschijnlijk het gevolg van verschillen in bewolgingsgraad. Wel valt op dat de berekende netto (uit)straling voor De Veenkampen en De Bilt in de nacht negatiever uitvallen dan de gemeten waarden op De Veenkampen. Het gebruik van de berekeningsmethode voor netto-straling (paragraaf 3.3) lijkt dus vrij goede schattingen op te leveren.



Figuur 3.6 Netto-straling aan maaiveld (Q_{net}) voor a) locatie De Veenkampen: gemeten versus berekende netto-straling en b) locatie De Veenkampen (gemeten) versus locatie De Bilt (berekende waarden) voor de maand juli 2018. In c) zijn de gemeten en berekende netto-straling voor locatie De Veenkampen gegeven voor het hele jaar 2018: regressielijn: $y = 24.5 + 0.94x$, $R^2 = 0.98$.

3.6 Simulaties met SWAP-WOFOST voor locatie De Veenkampen

Op de foto in Figuur 3.7 is een impressie te zien van de locatie van het weerstation De Veenkampen. Hier is links van het midden een onbegroeide, vierkante plot te zien. Zeer waarschijnlijk worden hier de metingen voor kale grond uitgevoerd.

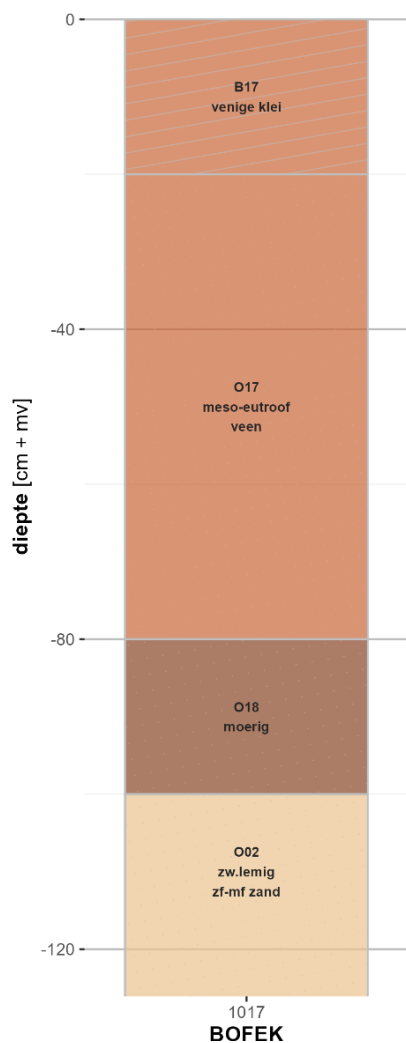


Figuur 3.7 Zicht op een deel van meteostation De Veenkampen (Foto: WUR).

Uit de Waterwijzer Landbouw database (versie 3.0.0) is run 106219 geselecteerd (BOFEK 1017, gemaaid grasland, GHG = 30 cm-mv, GLG = 90 cm -mv) (Figuur 3.8). SWAP-WOFOST simulaties zijn uitgevoerd met klimaatgegevens van De Bilt, dit omdat de gemeten klimaatgegevens van De Veenkampen ruwe data betreffen (niet gehomogeniseerde tijdreeksen zoals bij KNMI) en er data ontbreken. De enige gegevens die van locatie De Veenkampen zijn gebruikt, zijn de uurlijkse gemiddelde luchttemperatuur en de uurlijkse gemiddelde netto-straling. Ontbrekende data zijn niet aangevuld, maar hiervoor worden de tussenliggende waarden lineair geïnterpoleerd. Daar waar gegevens ontbraken zijn die handmatig vervangen door metingen van de vorige dag(en) op dezelfde tijdstippen.

Simulaties zijn uitgevoerd voor twee type begroeiingen: gras of kale grond, en er zijn drie bovenrandvoorwaarden voor bodemtemperatuur gehanteerd: 1) gemiddelde dagtemperatuur van de lucht (gemiddelde van T_{min} en T_{max}), 2) uurlijkse lokale luchttemperatuurwaarden, 3) uurlijkse lokale netto-stralingswaarden. De netto-straling hoefde niet zelf berekend te worden, maar zijn in de gegevens van De Veenkampen rechtstreeks beschikbaar. De straling wordt op de locatie De Veenkampen op één plaats gemeten: er zijn dus geen verschillen in netto-straling voor begroeide en onbegroeide situaties beschikbaar.

Specifieke aanpassing in de invoer: onderrand bodemtemperatuur verandert van geen temperatuurgradiënt naar een constante bodemtemperatuur op 600 cm -mv (8°C). Hiermee werd voorkomen dat de toenemende trend in gesimuleerde bodemtemperatuur niet te groot werd. Voor de simulaties voor de kale plot is de optie voor reductie van bodemverdamping aangepast van de methode Boesten-Stroosnijder naar methode Darcy. Hiermee werd iets meer bodemverdamping gerealiseerd.

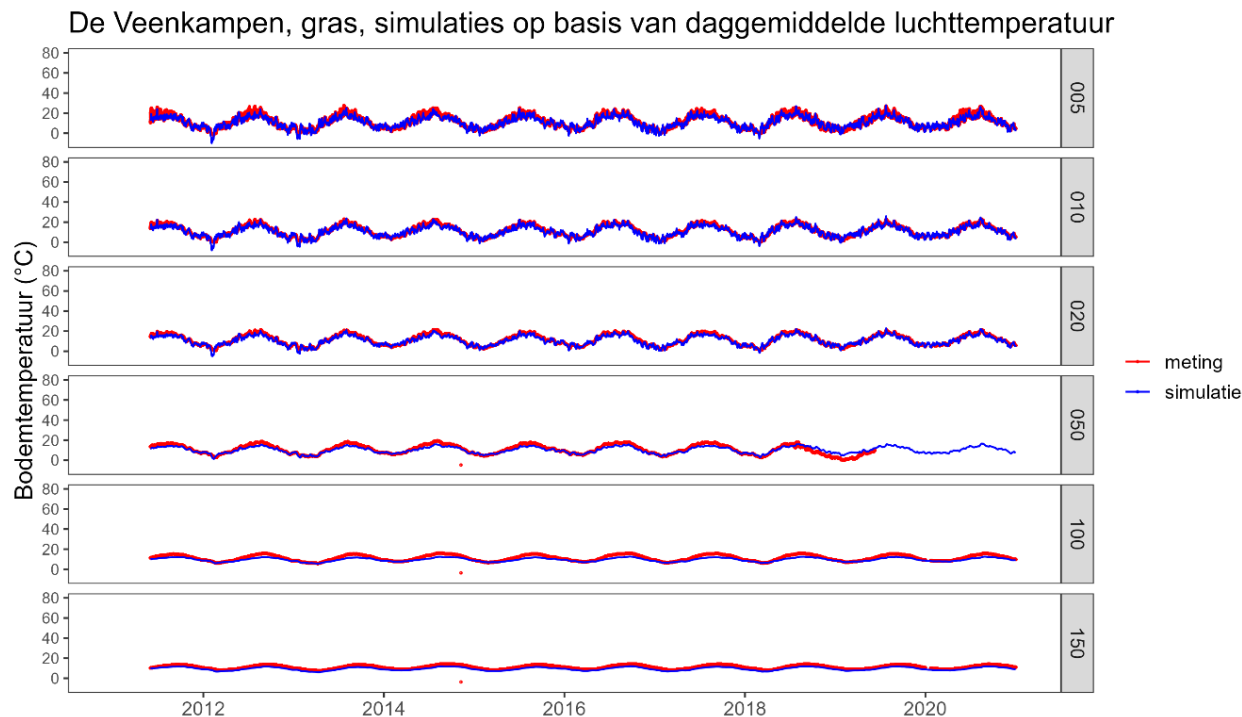


Figuur 3.8 Bodemprofiel De Veenkampen.

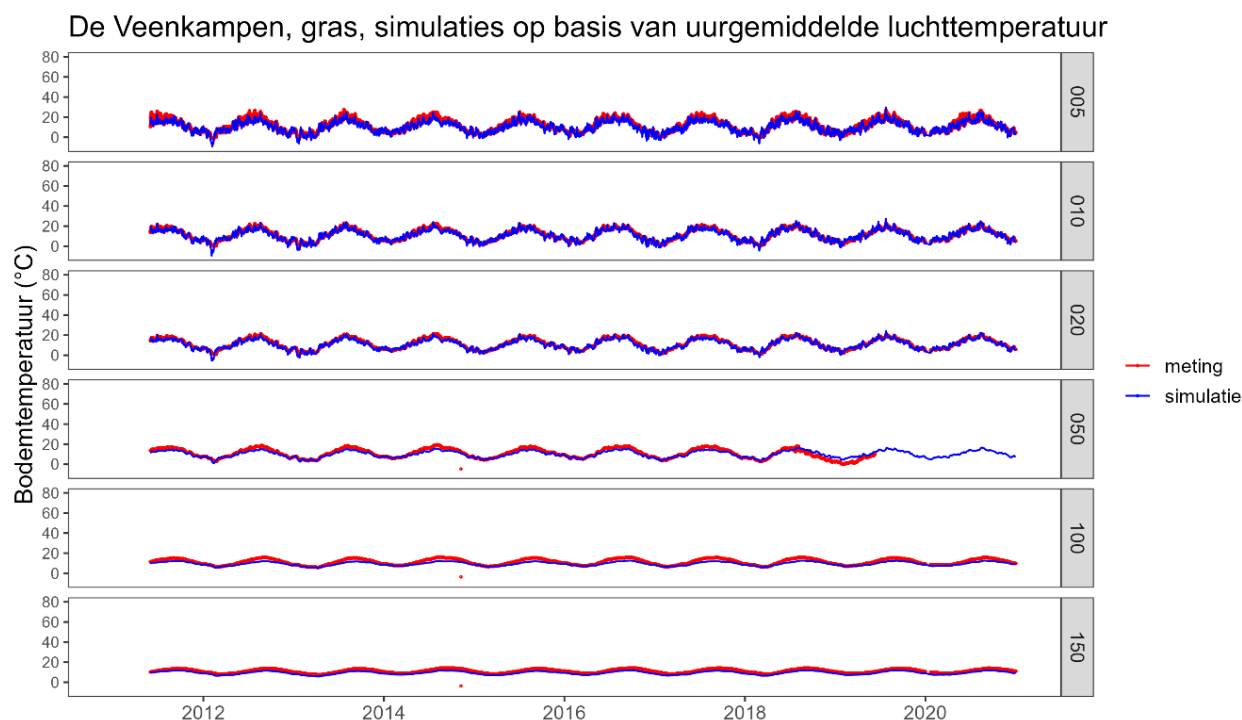
3.6.1 Resultaat gras

Gesimuleerde bodemtemperatuur op zes dieptes komt vrij goed overeen met metingen wanneer als bovenrandvoorwaarde de luchttemperatuur wordt beschouwd (Figuur 3.9, Figuur 3.10). Wanneer de netto-straling, vermenigvuldigd met $c_G = 0.1$ (zie vergelijking 3-2), als bovenrand wordt gebruikt, dan zijn de gesimuleerde bodemtemperaturen iets hoger dan gemeten (Figuur 3.11). Het verlagen van de c_G -waarde leidt niet alleen tot een verschuiving naar beneden, maar ook tot een afname van de seizoenale amplitude. Met andere woorden, er wordt geen betere fit verkregen door alleen de waarde voor c_G te veranderen.

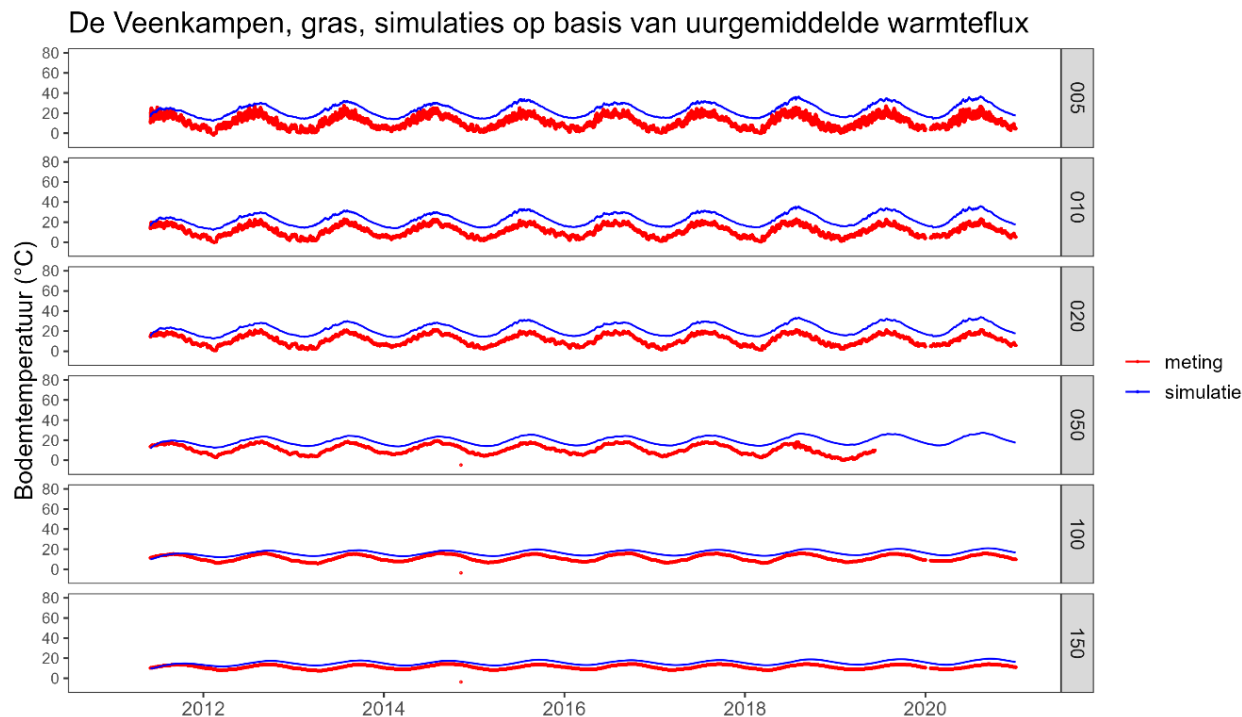
Tevens lijkt het erop dat er een grotere toename in de gesimuleerde trend is dan volgens de metingen. Deze toename was iets groter wanneer de onderrandvoorwaarde voor bodemtemperatuur op geen-temperatuurgradiënt was gesteld. Blijkbaar is de werkelijke netto toevoer van warmte niet volledig gelijk aan de netto-straling zoals hier verondersteld.



Figuur 3.9 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) bodemtemperatuur op zes dieptes (5, 10, 20, 50, 100, 150 cm -mv) voor de gras plot op locatie De Veenkampen. Bij de simulaties is gebruikgemaakt van daggemiddelde luchttemperatuur als bovenrandvoorwaarde voor de bodemtemperatuursimulaties.



Figuur 3.10 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) bodemtemperatuur op zes dieptes (5, 10, 20, 50, 100, 150 cm -mv) voor de gras plot op locatie De Veenkampen. Bij de simulaties is gebruikgemaakt van uurlijks gemeten luchttemperatuur als bovenrandvoorwaarde voor de bodemtemperatuursimulaties.

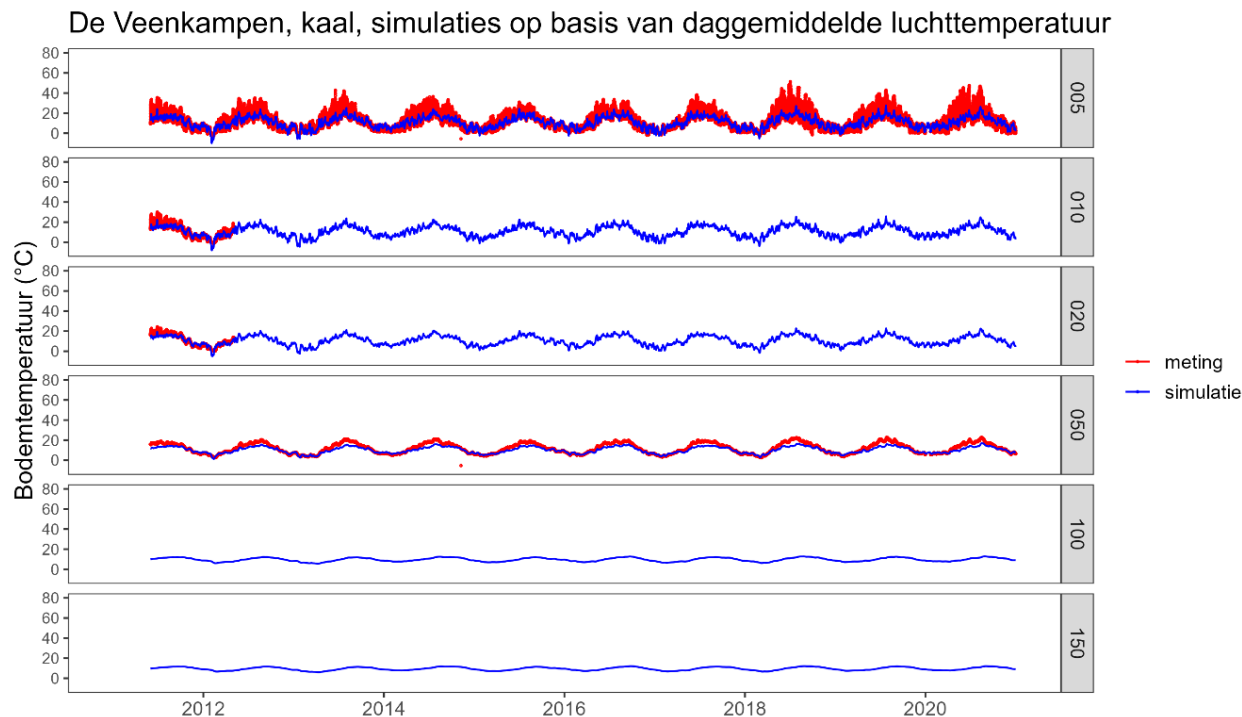


Figuur 3.11 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) bodemtemperatuur op zes dieptes (5, 10, 20, 50, 100, 150 cm -mv) voor de gras plot op locatie De Veenkampen. Bij de simulaties is gebruikgemaakt van uurlijks gemeten netto-straling vermenigvuldigd met $c_G = 0.1$ als bovenrandvoorwaarde voor de bodemtemperatuursimulaties.

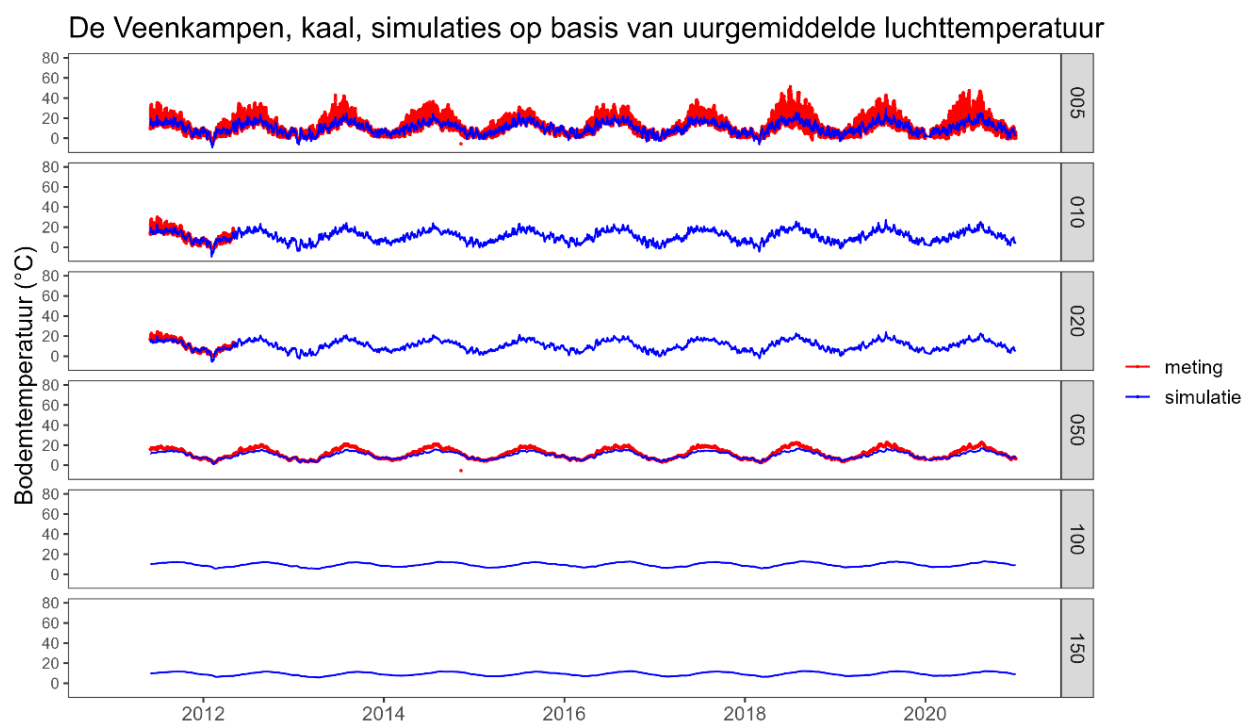
3.6.2 Resultaat kale grond

Gesimuleerde bodemtemperatuur op 6 dieptes komt qua orde grootte redelijk overeen met metingen wanneer als bovenrandvoorwaarde de luchttemperatuur wordt beschouwd (Figuur 3.12, Figuur 3.13). Echter, zeker in de zomermaanden worden de gemeten pieken en hoge temperaturen niet voorspeld met het simulatiemodel.

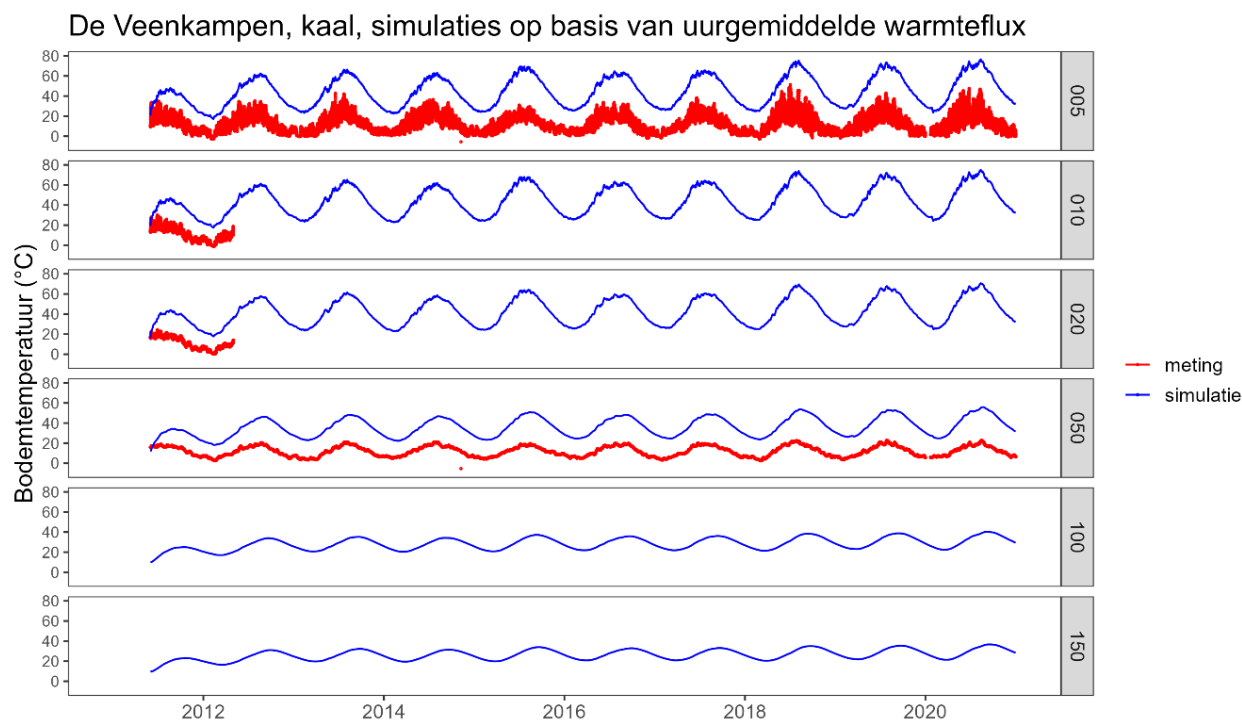
Wanneer de netto-straling als bovenrand wordt gebruikt, dan zijn de gesimuleerde bodemtemperaturen veel hoger dan gemeten (Figuur 3.14). De simulaties betreffen de situatie waarbij de warmte-input gelijk werd gesteld aan 0.2 keer de netto-straling ($c_G = 0.2$). Wanneer $c_G = 0.5$, een advieswaarde voor volledige kale bodem (Moene and Van Dam, 2014), dan is de overschatting uiteraard nog veel groter. Met de gemeten warmteflux als bovenrandvoorwaarde wordt geen grote dynamiek in de bodemtemperaturen nabij maaiveld gesimuleerd. Het verlagen van de c_G -waarde leidt niet alleen tot een verschuiving naar beneden, maar ook in een afname van de seizoenale amplitude. Met andere woorden, er wordt geen betere fit verkregen door alleen de waarde voor c_G te veranderen.



Figuur 3.12 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) bodemtemperatuur op zes dieptes (5, 10, 20, 50, 100, 150 cm -mv) voor de onbegroeide plot (kaal) op locatie De Veenkampen. Bij de simulaties is gebruikgemaakt van daggemiddelde luchttemperatuur als bovenrandvoorwaarde voor de bodemtemperatuursimulaties.



Figuur 3.13 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) bodemtemperatuur op zes dieptes (5, 10, 20, 50, 100, 150 cm -mv) voor de onbegroeide plot (kaal) op locatie De Veenkampen. Bij de simulaties is gebruikgemaakt van uurlijks gemeten luchttemperatuur als bovenrandvoorwaarde voor de bodemtemperatuursimulaties.



Figuur 3.14 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) bodemtemperatuur op zes dieptes (5, 10, 20, 50, 100, 150 cm -mv) voor de onbegroeide plot (kaal) op locatie De Veenkampen. Bij de simulaties is gebruikgemaakt van uurlijkse gemeten netto-straling vermenigvuldigd met $c_G = 0.2$ als bovenrandvoorwaarde voor de bodemtemperatuursimulaties.

3.6.3 Discussie dataset en modellering De Veenkampen

Voor locatie KNMI was eerder beschreven dat er voor een begroeide situatie, voor de drie gehanteerde bovenrandvoorwaarden voor bodemtemperatuur, een vrij goede overeenkomst werd verkregen tussen gesimuleerde en gemeten bodemtemperaturen (paragraaf 3.4). Voor De Veenkampen zien we echter dat dit voor een begroeide situatie minder het geval is wanneer een warmteflux als bovenrandvoorwaarde wordt beschouwd (Figuur 3.11).

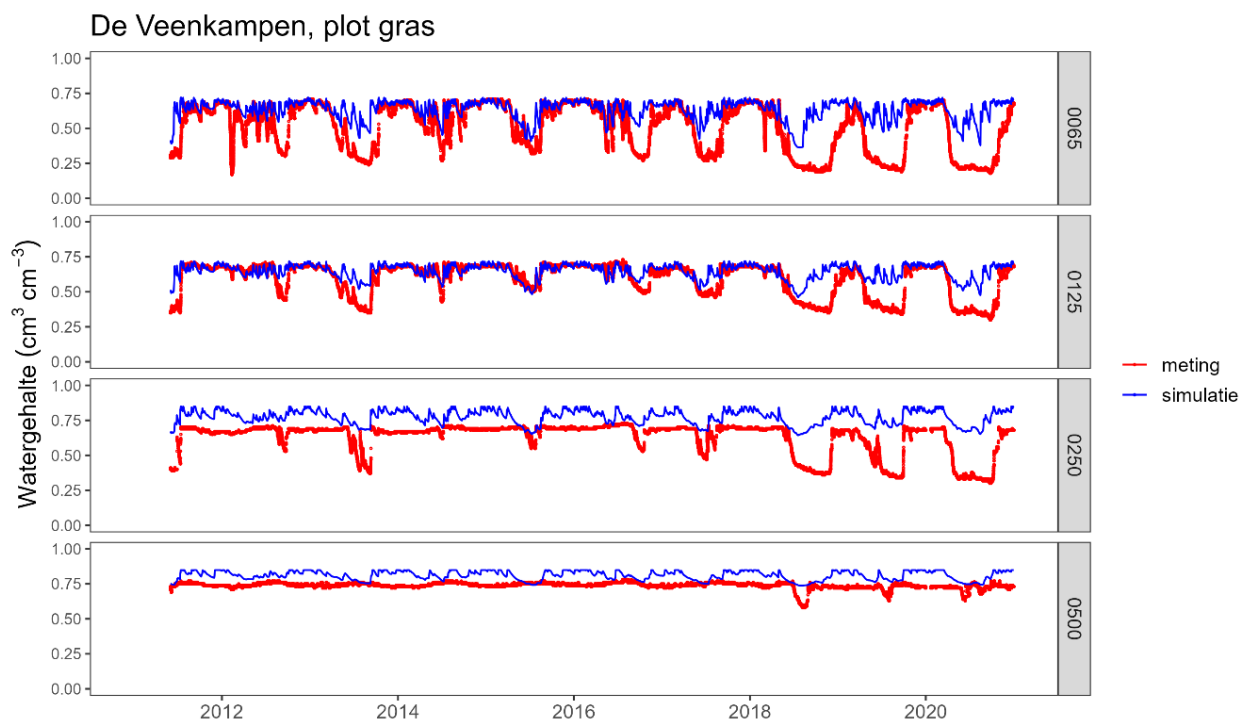
De verwachting dat de aanpak ook zou moeten gelden voor een onbegroeide situatie blijkt op De Veenkampen niet op te gaan (Figuren 3-12, 3-13, 3-14). Er wordt minder kortetermijndynamiek gesimuleerd dan gemeten, en zeker de toepassing van de warmteflux-input leidt tot overschatting van de bodemtemperatuur.

De warmtebeweging in de bodem is een functie van de warmte-eigenschappen van de aanwezige elementen. Dat betreft de minerale bodemdeeltjes, het organischestofgehalte, water en lucht. De textuur en het organischestofgehalte zijn overgenomen uit de gegevens van de bodemkaart/BOFEK. Het water- en luchtgehalte wordt door SWAP-WOFOST gesimuleerd.

Het blijkt dat met name in de zomermaanden de gesimuleerde watergehaltes hoger uitvallen dan de metingen. Voor de met gras begroeide situatie is nog wel enige daling in watergehalte in de zomermaanden zichtbaar (Figuur 3.15), maar voor de kale grond-situatie is de daling veel geringer dan gemeten (Figuur 3.16). Dat heeft natuurlijk een grote invloed op processen die afhankelijk zijn van het watergehalte, zoals de simulatie van bodemtemperatuur. Wel is het zo dat indien lagere watergehaltes zouden zijn gebruikt in de simulatie, de bodemtemperaturen hoger gaan uitvallen. Daarom zou het ook verstandig zijn om lokale textuur, organischestofgehalten en droge bulkdichtheden te meten, omdat deze bepalen hoe de bijdrage van de vaste fase is in de warmtegeleiding.

De vraag is nog wel waarom in de kale grond de gemeten watergehaltes zo sterk dalen, en of dit volledig het gevolg is van verdamping aan de bovenzijde van het maaiveld. Als inderdaad de plot met kale bodem vrij klein is (zie eerder getoonde foto), is het de vraag of de toestand in de bodem beïnvloed wordt door de omliggende begroeide situatie. Er kunnen wortels van naastgelegen gras aanwezig zijn in de kale plot, maar ook kan het zijn dat er horizontale vereffening van verschillen in watergehalte optreden. Als laatste dient opgemerkt te worden dat de bovenlaag een venige kleilaag betreft. Wanneer scheuren in deze laag ontstaan tijdens de zomer, dan is er sprake van een toename van het verdampende oppervlak; immers verdamping kan ook op grotere diepte in de scheuren optreden, waardoor een uitdroging ook op diepte kan optreden. Deze drie aspecten kunnen niet worden meegenomen in de SWAP-WOFOST-simulaties. De huidige optie macroporiën in SWAP-WOFOST houdt geen rekening met verdamping via de wand van de macroporie.

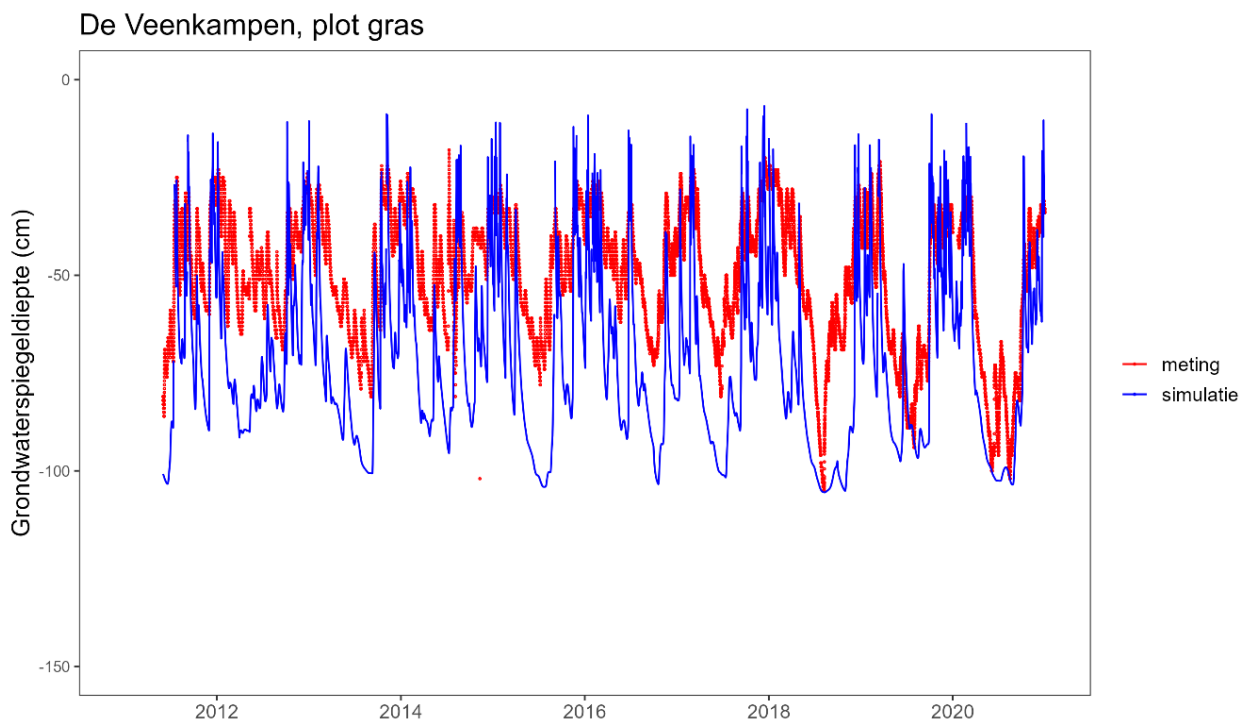
Vanwege al deze onzekere aspecten moet vastgesteld worden dat de dataset voor onbegroeide situatie op De Veenkampen niet gebruikt kan worden voor validatie bodemtemperatuursimulaties met SWAP-WOFOST. De vraag is of de gemeten warmtefluxen, bodemtemperaturen en watergehaltes gelijk zijn aan een situatie waarbij het hele perceel kaal zou zijn. Er is aanvullende (bodem)informatie nodig om SWAP-WOFOST te parametriseren. Maar ook is duidelijk dat de bovenrandvoorwaarde waarmee SWAP-WOFOST de bodemtemperatuur berekent, niet altijd de hoogfrequente gemeten temperatuurfluctuaties kan simuleren, zeker niet wanneer gebruikgemaakt wordt van een warmteflux als bovenrandvoorwaarde.



Figuur 3.15 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) watergehaltes in de bodem op vier dieptes (6.5, 12.5, 25, 50 cm -mv) voor de begroeide plot (gras) op locatie De Veenkampen.



Figuur 3.16 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) watergehaltes in de bodem op vier dieptes (6.5, 12.5, 25, 50 cm -mv) voor de onbegroeide plot (kaal) op locatie De Veenkampen.



Figuur 3.17 Gemeten (rood) en gesimuleerde (blauw) grondwaterspiegeldiepte voor de begroeide plot (gras) op locatie De Veenkampen.

Er is ook nagegaan of beide type randvoorwaarden (opgelegde temperatuur aan maaiveld en opgelegde warmteflux aan maaiveld) gecombineerd als bovenrandvoorwaarde bij de simulaties van bodemtemperatuur gebruikt kan worden. In dat geval wordt de temperatuur aan maaiveld gelijk aan de opgelegde temperatuur en wordt de bodemtemperatuur van het eerste rekenlaagje bepaald door de warmteflux en de temperatuur

aan maaiveld (zie Bijlage 2). Simulaties met $c_G = 0.2$ en $c_G = 0.5$, en dus twee verschillende warmtefluxen maar gelijke temperatuur aan maaiveld, leidden tot minimale verschillen in gesimuleerde bodemtemperatuur op de beschouwde dieptes (geen data getoond). De gesimuleerde bodemtemperaturen weken nauwelijks af van de situatie waarbij opgelegde bodemtemperatuur als randvoorwaarde wordt beschouwd. Deze aanpak is niet nader uitgewerkt.

3.7 Conclusies berekening bodemtemperatuur

Uit de analyses die in dit hoofdstuk zijn beschreven, kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Voor kort gemaaid grasland (typisch landgebruik bij weerstations) zijn gemeten daggemiddelde of uurlijkse luchttemperaturen op 1-2 m boven maaiveld goed bruikbaar als bovenrandvoorwaarde voor simulaties van de bodemtemperatuur in het simulatiemodel SWAP-WOFOST. Voor locatie De Bilt en locatie De Veenkampen zijn in dat geval de overeenkomsten tussen gemeten en gesimuleerde bodemtemperaturen op diverse dieptes goed.
- Simulaties met dezelfde luchttemperaturen als randvoorwaarde voor andere landgebruiken (andere gewassen, of voor kale bodem) leveren dan echter vrijwel dezelfde gesimuleerde bodemtemperaturen. Met name voor kale bodems is de verwachting dat de bodemtemperatuur daar anders is dan in begroeide situaties.
- De berekende netto-straling volgens het concept van De Bruin & Holtslag (1982) komt vrij goed overeen met gemeten netto-straling voor locatie De Veenkampen.
- De vertaling van de netto-straling naar een warmteflux aan maaiveld door te veronderstellen dat de warmteflux aan maaiveld een fractie (c_G) van de netto-straling is, lijkt goed te werken met betrekking tot gesimuleerde bodemtemperaturen voor de met gras begroeide situatie in De Bilt.
- Voor de locatie De Veenkampen leidt dit echter tot een lichte overschatting van de gesimuleerde bodemtemperaturen voor de situatie met gemaaid grasland. Mogelijk dat verbeteringen te verkrijgen zijn door gemeten bodemeigenschappen van de betreffende locatie als invoer in SWAP-WOFOST te hanteren in plaats van gegevens van de Bodem- en BOFEK-kaart.
- Door de waarde van c_G te verhogen, zal de warmteflux aan maaiveld toenemen en hogere bodemtemperaturen gesimuleerd worden. Dat past bij de hogere gemeten bodemtemperaturen onder kale grond. Echter, deze eenvoudige aanpak heeft (nog) niet geleid tot goede overeenkomst tussen gesimuleerde en gemeten bodemtemperaturen voor een kale plot op locatie De Veenkampen. Ook hier geldt: mogelijk dat verbeteringen te verkrijgen zijn door gemeten bodemeigenschappen van de betreffende locatie als invoer in SWAP-WOFOST te hanteren in plaats van gegevens van de Bodem- en BOFEK-kaart.

4 Opwarming van de bodem en de gevolgen voor de natuur

4.1 Inleiding

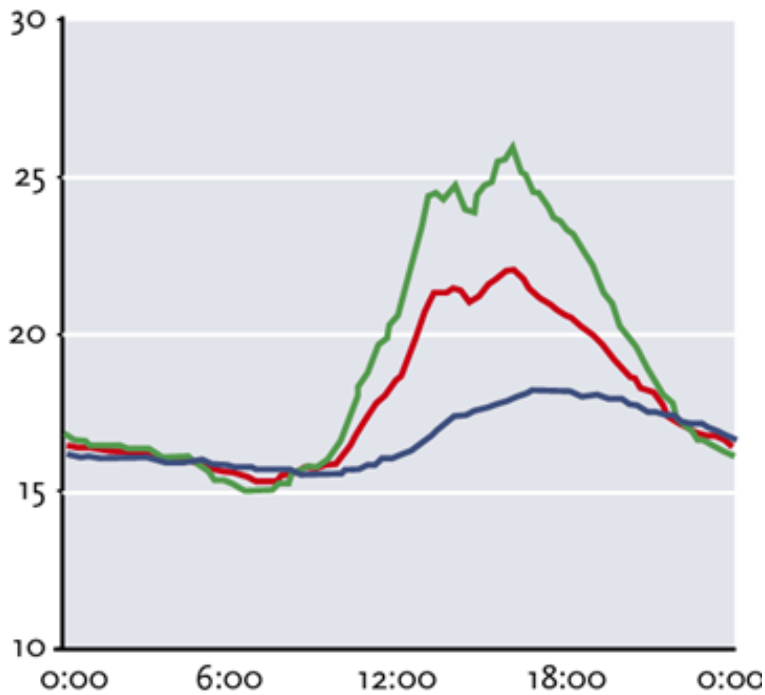
Zoals geconstateerd in Bakema et al. (2022) kan de bodemtemperatuur een significante invloed hebben op de groei en ontwikkeling van planten en andere organismen die in de bodem leven. De omgevingstemperatuur is sturend voor veel biologische en fysiologische processen. De turnover van nutriënten, de groei en ontwikkeling van planten, het kiemen van zaden en de activiteit van bodemleven worden grotendeels gestuurd door een combinatie van omgevingstemperatuur en beschikbare bronnen. Over het algemeen kunnen warmere bodemtemperaturen de groei en ontwikkeling van planten versnellen, terwijl koelere bodemtemperaturen deze kunnen vertragen. Een opwarming van de bodemtemperatuur zal in die zin leiden tot een toename in de groei van planten, mits er geen limiterende factoren zijn. Voor open begroeiingen kan dit betekenen dat het open karakter onder druk komt te staan door vergrassing en verruiging.

In deze vervolgstudie proberen we de gevolgen van een potentiële opwarming van de bodem concreet te maken voor de natuurontwikkeling in Nederland.

De Nederlandse natuur telt vele verschillende natuurtypen die in allerhande classificaties zijn op te delen. Fundamenteel voor alle natuurtypen is de bodem. Grofweg spreken we in Nederland van een zand-, veen- of kleibodem, maar hierbinnen zijn weer tal van gradiënten waar te nemen. Elk bodemtype bepaalt deels welke begroeiing hier kan plaatsvinden. Een complex van factoren waarbij de beschikbaarheid van water en voedingsstoffen doorslaggevend zijn voor de plantengroei bepaalt de samenstelling van de vegetatie. Daarnaast kunnen het klimaat, de geografische regio en de verspreiding (smogelijkheden) bepalend zijn voor het voorkomen van een soort.

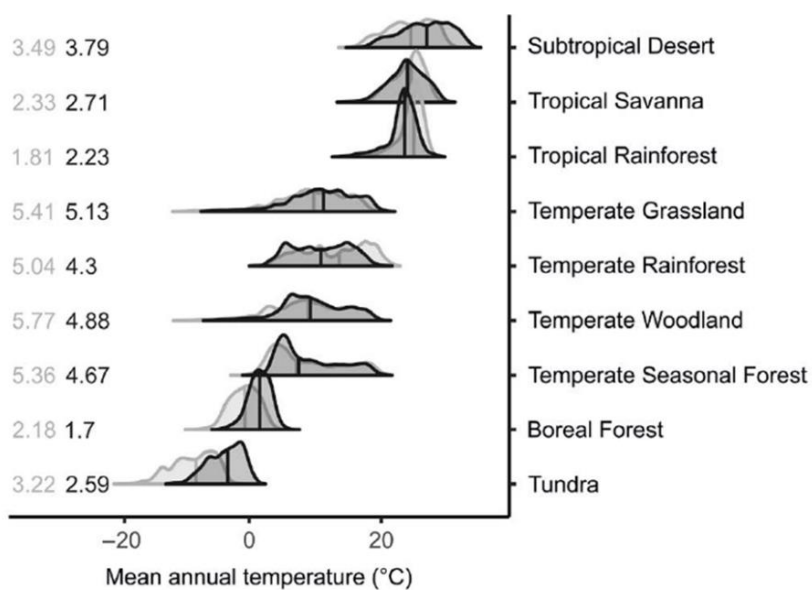
Tijdens deze studie komt telkens naar voren dat bodemtemperatuur en vegetatie twee factoren zijn die elkaar sterk beïnvloeden. Wanneer eenzelfde bodem kaal is, zal de bodemtemperatuur zich anders ontwikkelen dan wanneer deze begroeid is. Enerzijds zal de mate van begroeiing, de biomassa maar ook de structuur van de vegetatie, de temperatuursontwikkeling beïnvloeden, waarbij er doorgaans een demping plaatsvindt van de lokale instraling. Door beheersmaatregelen uit te voeren op een begroeiing kan de mens weer invloed uitoefenen op de bodemtemperatuur. Anderzijds kan ook een bodemtemperatuur bepalend zijn voor het succes van groeiende planten. Het kiemen van zaden en de mogelijkheid van planten om zich te vestigen, hangen hiermee samen.

Dat vegetatie een rol heeft in de fluctuaties van de bodemtemperatuur laten de berekeningen eerder in deze rapportage zien. Op de veengronden van de Veenkampen is in de zomersituatie te zien dat temperatuursfluctuaties meer dan 10 keer in amplitude kunnen toenemen wanneer er geen begroeiing aanwezig is (Zie Bijlage 1, Figuur B1.4). Nog steeds is er een fluctuatie in de bodemtemperatuur wanneer er een grasbegroeiing aanwezig is, maar deze is gering. Hierbij moet worden opgemerkt dat het op De Veenkampen niet duidelijk is in welke staat de grasbegroeiing is. Lang, ongemaaid gras vormt doorgaans een betere buffer dan (zeer) kort gemaaid gras. Zelfs gras dat niet recentelijk maar wel eerder gemaaid is, kan de bufferfunctie verminderen (Bobbink et al., 2009; Figuur 4.1). Daarentegen kan recentelijk gemaaid gras de bodemtemperatuur zelfs doen dalen door een surplus in de verdamping.



Figuur 4.1 De bodemtemperatuur over een dag in mei in een kalkgrasland (10 cm diepte). De groene lijn laat een kaalgeknipte situatie zien, de rode lijn laat een gemaaide situatie zien (enkele maanden na het maaien) en de blauwe lijn laat een niet-gemaaide situatie zien (Smits et al., 2009).

Wereldwijd zijn er effecten van vegetatiestructuren op de temperatuursregulatie van de bodem aangetoond. Lembrechts et al. (2022) bracht de relaties tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur in kaart in verschillende biomen op de wereld (Figuur 4.2). Hierin is te zien dat met name in koele en droge biomen, de bodemtemperatuur gemiddeld hoger ligt dan de luchttemperatuur (dikgedrukte versus transparante lijnen). In vochtige warme systemen ligt de bodemtemperatuur doorgaans lager dan de gemiddelde luchttemperatuur in een jaar. Voor Nederland zou je deze biomen kunnen vertalen naar met name droge en vochtige begroeiingen. Mogelijk dat voor droge duingraslanden en heiden er dus sprake is van een relatief hoge bodemtemperatuur, terwijl dichte (vochtige) bossen en venen een relatief lage bodemtemperatuur laten zien.



Figuur 4.2 Jaarlijkse gemiddelde bodemtemperatuur versus de jaarlijkse gemiddelde luchttemperatuur in verschillende biomen; Lembrechts et al. (2022).

Voor twee natuurstypen beschouwen we hieronder de effecten van een bodemtemperatuurstoename. Daarvoor nemen we twee extreme begroeiingstypen. We beginnen met de duingraslanden; een open en droog systeem met een hoge dynamiek en grote extremen. Vervolgens beschouwen we de gesloten hellingbossen in Zuid-Limburg met juist een zeer lage dynamiek.

4.2 De duinen

De Nederlandse duinsystemen (Figuur 4.3) worden gekenmerkt door grote afwisselingen in de vegetatiestructuur. Open zand, kort maar dicht grasland, struwelen en zelfs bossen zijn er op korte afstand van elkaar te vinden. In de duingraslanden, maar ook de duinheiden die we ten noorden van de kalkgrens bij Bergen vinden, is dit mozaïek van vegetatiestructuren een essentieel onderdeel van het functioneren van het duinlandschap en daarmee de basis voor, voor Nederland, zeer soortenrijke begroeiingstypen.



Figuur 4.3 Verspreiding grijze duinen in Nederland. Dit zijn onder meer de kalkrijke en kalkarme duingraslanden en duinheiden. De groene en blauwe vakjes geven waargenomen locaties aan met dit habitattype, de gearceerde vakken geven het potentieel verspreidingsgebied in uurhokken aan (SynBioSys, 2022).

Het mozaïek wordt gevormd door een carrousel van successie (Figuur 4.4). De, in ideale omstandigheden, hoge dynamiek in de duinen zorgt voor een continue invloed van overstuivend zand dat van het strand of de witte duinen van de zeereep over de duingraslanden wordt verspreid via de wind. Ten tijde van stormen, maar ook bij wisselende windrichtingen, kan de intensiteit van die overstuiving toenemen (of afnemen) in de context van het reliëf van het landschap. Eenmaal in de 'grijze duinen' kunnen open, zandige plekken gekoloniseerd worden door mossen en korstmossen, maar ook doorplanten zoals zandzegge (*Carex arenaria*)

die groeien in een klonaal netwerk met door rhizomen aan elkaar verbonden individuen. De afwezigheid van beschikbare voedingsstoffen, de droge omstandigheden en de extreme temperaturen (door zowel instraling overdag of uitstraling 's nachts) zijn een uitdaging voor de plantensoorten die hierop voorkomen. De mossen en korstmossen die op het kale zand voorkomen, zijn aangepast aan de extreme omstandigheden. Ze weten de verdamping te beperken en efficiënt om te gaan met het vaak tijdelijk beschikbare water. Klonale soorten, zoals de eerdergenoemde zandzegge, kunnen de kale plekken koloniseren doordat water en voedingsstoffen uit een ander, vaak beschutter, deel van het klonale netwerk gehaald kunnen worden via de stolonen (wortelstokken). Als eenmaal een vegetatie zich weet te vestigen, hopen organisch materiaal en vocht zich op in de vegetatie. De aanwezigheid van kalk in de zandbodem zorgt voor een hogere pH en betere beschikbaarheid van de aanwezige mineralen, waardoor ook minder stressbestendige planten zich kunnen vestigen. De eerste grassen en kruiden die zich vestigen, kunnen zich vaak ook goed staande houden in een zeer kort begroeide omgeving, waar begrazing door konijnen en de overstuiving met scherp zand de planten klein houdt. Naarmate de vegetatie ouder wordt en de organische bodem toeneemt, kunnen ook grotere planten hier overleven. Duinriet en zandkweek kunnen op de nog altijd droge bodems goed overleven. De toegenomen stikstofdepositie zorgt de laatste jaren voor een enorme toename van grassen in de duinen. Door de continue uitbraken van konijnenziekten weten de konijnen de duingraslanden niet meer open te houden en zet de vergrassing zich door. Een steeds ruiger grasland, waar ook kruipende struiken als dauwbraam en later ook vlier en meidoorn zich weten te vestigen, is het gevolg. Op de bodem is inmiddels een dichte organische laag ontstaan die, wanneer er geen begrazing of vergraving optreedt, zelfs kan vervilt tot een dichte laag waar verdamping en instraling sterk gebufferd worden.

Echter hiermee komt ook het dynamische proces in de duinen tot stilstand. Soorten die gebaat zijn bij die dynamiek zullen verdwijnen en eens soortenrijke duingraslanden vervallen tot monotone graslanden.

Om dit te voorkomen, worden er door de terreinbeheerders pogingen gedaan om de vegetatie open te houden. Veelal wordt dit gedaan door het inzetten van grote grazers die verruiging tegengaan, maar een wisselend succes boeken tegen de monotone begroeiingen van hoge grassen. Ook de konijnenpopulaties herstellen is een ingewikkeld proces waar nog geen definitieve oplossing voor is. Daarom wordt er vaak een mechanische ingreep gedaan. Delen van duingraslanden en duinvalleien worden geplagd en de steeds hoger wordende witte duinen worden doorkerfd om de overstuiving op gang te brengen.



Figuur 4.4 De Landerummerheide op Terschelling laat de heterogeniteit van de het duingebied zien met een mozaïek van struweel, heide, grasland en open zand (foto: Nils van Rooijen).

Wanneer er een zandige plek gecreëerd is – doorgaans wordt dit een stuifkuil genoemd – gaan er verschillende processen spelen. De bedoeling van een stuifkuil is dat de wind en het zand een interactie

aangaan en dat de stuifkuil een bron wordt voor mineraalrijk zand voor de omgeving. Maar uiteindelijk zal ook een stuifkuil weer dichtgroeien. Echter is de vraag hoe snel dit gaat.

Stuifkuilen kunnen hitte-eilanden vormen in de duinvegetatie, vergelijkbaar met andere niet- begroeide bodemoppervlakten (Renc et al., 2022). Door de grote instraling en de kale bodem zullen, net als op de kale grond in de Veenkampen, grote temperatuursverschillen ontstaan tussen dag en nacht, die met een scherpe gradiënt zullen overgaan naar de aangrenzende vegetatie. Waar het 's nachts vaak sterk afkoelt, kunnen de bodemtemperaturen overdag oplopen tot boven de 50°C op een zonnige zomer dag (KNMI, 2023). Niet alleen is de verdamping dan zo hoog dat er minder water beschikbaar is, maar ook zorgen deze temperaturen voor een dermate fysiologische stress dat planten en dieren (waaronder bodemfauna) het zwaar hebben.

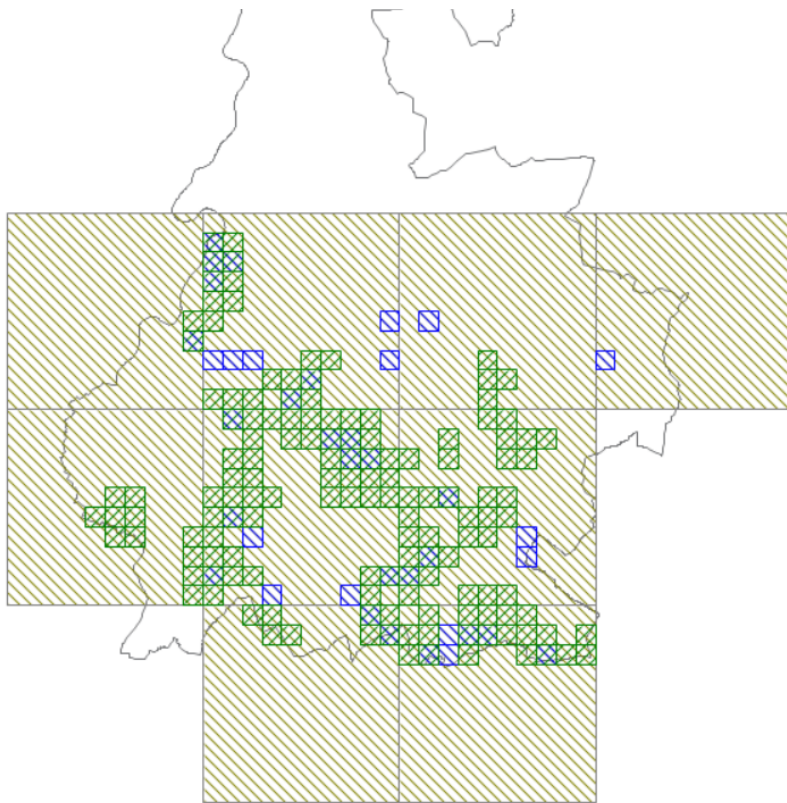
Het formaat van een stuifkuil bepaalt deels hoe snel het duurt voordat deze weer is dichtgegroeid. Waar de extreme omstandigheden worden doorbroken door een oneffenheid, bijvoorbeeld een beschutte richel of een overgebleven struik, kunnen triggerpunten ontstaan voor de vegetatie. Langs de randen van de vegetatie zullen de extreme omstandigheden snel afnemen en wordt ook de bodemtemperatuur gebufferd door de schaduw van de vegetatie (en een stilstaande luchtlaag), zodat vanuit hier de successie grip kan krijgen op het open zand. Uiteindelijk is het het microklimaat op een kleine schaal dat de vegetatie reguleert en die door de vegetatie wordt gereguleerd.

Maar ook grootschalige klimaatfactoren zijn erg belangrijk. Een droog, zonnig (en liefst winderig) jaar vergroot het hitte-eiland effect van de stuifkuilen. Niet alleen wordt successie hierdoor geremd, het is ook mogelijk dat de kuilen zich uitbreiden. Want aan de randen van de zandoppervlakten zullen ook de extreme condities hun weerslag vinden in de begroeiing.

In het open en dynamisch houden van de duinen is bodemtemperatuur een factor in een groter complex van factoren dat bepalend is voor het afremmen van successie. Klimaatfactoren zijn hierbij doorslaggevend. Beheersmaatregelen kunnen alleen zo toegepast worden dat er zo veel mogelijk aandacht geschonken wordt aan het complex van factoren. Zo kan er meer rekening gehouden worden met het hitte-eilandeffect van stuifkuilen. Uiteindelijk heeft de dynamiek van de duinen baat bij het in stand houden van de verscheidenheid. Een verscheidenheid in begroeiingen en daarmee ook een verscheidenheid aan microklimaten.

4.3 Hellingbossen

Hoe gevoelig een vegetatie is voor temperatuursveranderingen is voor een groot deel afhankelijk van het beheer. Maai- of hakhout beheer heeft een grote invloed op de vegetatiestructuur en de invloed van de begroeiing op de temperatuurregulatie. Een interessant voorbeeld is de ondergroei van Zuid-Limburgse hellingbossen. Het gaat hier om eiken-haagbeukbossen (Figuur 4.5 en Figuur 4.6).



Figuur 4.5 Verspreiding Eiken-haagbeukbossen in het heuvelland. De groene en blauwe vakjes geven waargenomen locaties aan met dit habitattype, de gearceerde vakken geven het potentieel verspreidingsgebied in uurhokken aan (SynBioSys, 2022).

In het Natura 2000-profielendocument (LNV, 2008) worden deze bossen als volgt beschreven:

"Eiken-haagbeukenbossen vormen een loofbosgemeenschap met een gevarieerde vegetatiestructuur met een (tot 30 m) hoge en een lage boomlaag, een goed ontwikkelde struiklaag en een weelderige, soortenrijke kruidlaag met typische soorten" (Ministerie LNV, 2008).



Figuur 4.6 Ondergroei hellingbos in het Heuvelland (foto: Joop Schaminée).

*De kruidlaag bezit doorgaans een mozaïekachtig karakter, doordat zowel ruimtelijk als in de tijd het lichtaanbod – en daarmee de warmte-instraling (zie ook Hommel et al., 2016) – op de bodem sterk wisselt. Veel soorten, waaronder diverse voorjaarsbloeiers, kunnen zich door middel van wortelstokken of bovengrondse uitlopers vegetatief sterk uitbreiden, waardoor ze in staat zijn grote en dikwijls aaneengesloten groepen te vormen. Een opvallende, altijd groene component in deze bossen is de Klimop (*Hedera helix*). Vaak groeit enige klimop op de bodem, maar in deze 'rijke bossen' dringt ze ook als liaan tot in het kroondak door. De gevarieerde structuur van deze eiken-haagbeukenbossen hangt samen met een eeuwenlange menselijke exploitatie, waarvan het middenbosbeheer het belangrijkste aspect vormt.*

Hoewel klimaatmodellen aangeven dat er sprake is van een toename van de (lucht)temperatuur, wijzen temperatuurindicatoren op een tegengestelde ontwikkeling (Schaminée, 2022). Deze indicatoren zijn gebaseerd op de aanwezige vegetatiesamenstelling. Hier is te zien dat er steeds meer koude-indicerende soorten aanwezig zijn in de ondergroei van de bossen. Dit heeft alles te maken met het beheer.

Tot halverwege de 20^e eeuw werden veel hellingbossen nog actief gebruikt voor de oogst van hakhout, waarbij de boomkronen continu open werden gesnoeid. Bovendien werd er vaak middenbosbeheer toegepast. Dit betekent dat er periodiek percelen bos werden gekapt waardoor er open plekken in het bos ontstonden. In de tweede helft van de 20^e eeuw is deze praktijk verdwenen. Hierdoor zijn de bossen langzaam hoger en dichter gegroeid. De hoeveelheid licht die in de zomer de grond bereikt, is daarmee flink afgenomen en daarmee ook de gemiddelde temperatuur. Dus hoewel het klimaat lokaal wel opwarmt, zorgt de als gevolg van een veranderd landgebruik hoog opgroeiende vegetatie voor een onafhankelijk veranderende bodemtemperatuur. Daarbij zijn ook de temperatuurfluctuaties aanzienlijk verminderd. Waar er na houtkap grotere fluctuaties in de temperaturen plaatsvonden – na de kap verschilden de dag- en nachttemperaturen tot soms wel 11 °C (op 1 cm diepte op een gemeten dag), terwijl dit in een vergelijkbaar gesloten (hakhout)bos ca. 3 °C is (Bobbink et al., 2008). Dezelfde verschillen ontstaan overigens ook in lagere begroeiingen zoals kalkgraslanden wanneer er tot op de bodem wordt gemaaid (zie ook paragraaf 4.1 en Smits et al., 2009).

Way et al. (2021) modelleren zelfs een afkoeling van de bodemtemperaturen als de vegetatiehoogte toeneemt, in het bijzonder in bossen. Niet alleen wordt de zomertemperatuur beperkt door schaduweffecten, in de winter kan het vasthouden van koude lucht of sneeuw zelfs zorgen voor verdere afkoeling. Waarschijnlijk spelen er in bossen meerdere feedbackloops die zorgen voor een stabilisatie van de bosbegroeiing onder invloed van temperatuur en licht. Zo kan koelte zorgen voor een afname van de zaailingoverleving door pathogenen, terwijl hogere bodemtemperaturen juist zorgen voor een afname van pathogenen waardoor er meer zaailingoverleving plaatsvindt.

4.4 Conclusies bodemtemperatuur en natuur

Bodemtemperatuur is niet zozeer een oorzaak, maar eerder een gevolg van de natuurontwikkeling boven het maaiveld. Het beheer van die natuur is doorslaggevend voor veranderingen in bodemtemperatuur en de mate waarin luchttemperatuur effect heeft op de temperatuur van de bovenste bodemlagen. Door het kort en open houden van de vegetatie krijgen de atmosferische condities meer vat op de bodemtemperatuur, waarbij de temperatuurextremen worden vergroot. In grasland kan dit door overstuiven, plaggen of zelfs gewoon maaien worden bewerkstelligd. Kappen en snoeien heeft hetzelfde effect in bossen en struwelen. Wanneer een vegetatie de kans krijgt om dichter te worden is het tegenovergestelde effect zichtbaar. Temperaturen worden gebufferd waardoor de koude- en warmtepieken lager liggen en met vertraging ten opzichte van de luchttemperatuursveranderingen optreden. De aanwezigheid van bodemvocht en bodemtype speelt hier doorheen. Zandige gronden zullen sneller uitdrogen waardoor de bufferende werking van vocht op de bodemtemperatuur sneller weg zal zijn, terwijl zavelige of kleihoudende bodems langer de bufferende werking van bodemvocht kunnen vasthouden.

Dat betekent niet dat bodemtemperatuur niet ook een factor van belang is. De temperatuur is, samen met de beschikbaarheid van water, bepalend voor fysiologische en bio(geo)chemische processen. Een hogere bodemtemperatuur bevordert het transport en de omzetting van nutriënten en organisch materiaal en de mate waarin bodemleven actief is. Een hogere bodemtemperatuur bevordert de ontwikkeling van schimmels en mycorrhiza en versnelt zowel de groei van wortels als de ontkieming van zaden. Zo wordt ook de

bovengrondse biomassa positief beïnvloed door hogere temperaturen onder het maaiveld. Mits de extremen niet zo hoog zijn dat dit belemmerend is voor biochemie. Doorgaans is dit boven de circa 40 graden als er geen additionele adaptaties zijn.

De successie in vegetatie is inherent verbonden aan de ontwikkeling in de bodemtemperatuur. Daarom zijn de gevolgen van een stijging van de bodemtemperatuur op natuurontwikkeling en de oorzaken van veranderingen in bodemtemperatuur moeilijk van elkaar te onderscheiden. Als er wordt uitgegaan van een stijging van de bodemtemperatuur die in enige mate de stijging van de luchttemperatuur volgt, zal dit in het algemeen de successie in vegetatie versnellen en daarmee, zonder ingrijpen, de stijging van bodemtemperatuur op termijn afremmen. Met name in de vroege stadia van successie zal een stijgende bodemtemperatuur het voorkomen van soorten (en niches) versmallen. Bodemtemperatuurverandering zal dus voornamelijk consequenties hebben voor de pioniermilieus, waar successie en kiemkracht nog door de aanwezige bodemtemperatuur wordt beïnvloed. Zodra er een vegetatie ontstaat, zal die direct effect hebben op de bodemtemperatuur.

Er rijst dan de vraag in hoeverre er in het natuurbeheer rekening gehouden dient te worden met een autonome stijging van de bodemtemperatuur. Zowel in De Veenkampen als in het Loobos zien we dat bodemtemperatuurverandering en luchttemperatuurverandering met elkaar verband houden en dat in de toplagen van de bodem hier weinig verschillen in optreden. Door de alom aanwezige feedbackloop van vegetatie op de bodemtemperatuur is er eigenlijk geen sprake van een autonome verandering van de bodemtemperatuur los van de omgevingstemperatuur. Een vegetatiestructuur zal een remmend effect hebben op additionele opwarming door bijvoorbeeld instraling. Een natuurbeheerder kan dus invloed uitoefenen op de bodemtemperatuur via de vegetatie, maar daarbij zal de maatregel op de vegetatie leidend zijn. Hoogstens op microschaal kunnen ingrepen uitgevoerd worden bij bodemtemperatuur gunstiger te maken is voor bijvoorbeeld insecten. Maar de algemene maatregel zal hierbij het openmaken of verwijderen van de vegetatie zijn.

Uiteindelijk zal microklimaat de doorslag geven. Een generieke stijging van de bodemtemperatuur zal op korte termijn geen merkbare effecten hebben op de natuurontwikkeling in Nederland. Lokaal is het mogelijk dat er kleine verschuivingen zullen optreden in de snelheid van successie of de activiteit van bodemfauna, maar het is de vraag of dit significante veranderingen zal opleveren. Zoals genoemd, zullen de effecten van bodemtemperatuur met name merkbaar zijn in open-pioniersituaties, waar zaadkieming en de eerste stappen van de successie het meest direct door temperatuur en vochtbeschikbaarheid bepaald worden.

We zijn voor deze studie beperkt tot beschouwingen in de context van de theorie. Hoewel we in de proefstations De Veenkampen en Loobos goede metingen hebben, zijn deze systemen moeilijk te vergelijken met natuurlijk beheerde situaties. De vegetatie op De Veenkampen is zeer intensief beheerd en ook het Loobos vertegenwoordigt geen direct natuurlijke bossituatie. Wel laten beide plekken de effecten van een begroeiingsstructuur helder zien. Omdat bodemtemperatuur nu doorgaans beschouwd wordt als een gevolg van de vegetatie in plaats van andersom, zou het nuttig zijn om meer metingen door het land uit te voeren, waar de bodemtemperatuursveranderingen onder verschillende begroeiingstypen gevolgd zouden kunnen worden. Hierbij zou bijvoorbeeld aangesloten kunnen worden bij de tijdreeksen binnen het Landelijk Meetnet Flora, waarbij bodemtemperatuurgegevens direct gekoppeld kunnen worden aan begroeiingstype, vegetatie en abiotiek ter plekke. Voor agrarische systemen, waar een open-pioniersituatie in stand wordt gehouden, zou bodemtemperatuur wel een direct effect kunnen hebben op de groei en kieming van gewassen. De geringe aanwezigheid van de micro-klimaten op intensief beheerde akkers zou een analyse van de effecten van een opwarming van de bodemtemperatuur beter mogelijk moeten maken.

5 Conclusie en vervolgonderzoek

Bodemtemperatuur wordt in Nederland maar op enkele plaatsen door het KNMI en (deels) door WUR langjarig gemeten. Die meetlocaties zijn veelal ingericht als graslanden die regelmatig worden gemaaid. Alleen voor De Veenkampen (kale grond) en Loobos (naaldbos) is gemeten onder andere omstandigheden. Dit maakt dat het doen van een historische trendanalyse en het extrapoleren van de trends naar omstandigheden buiten de meetlocaties, omgeven zijn met veel onzekerheden. Wel is getracht een model (SWAP-WOFOST) toe te passen waarbij voor meerdere bodem- en vegetatiecondities ook de bodemtemperatuur kan worden voorspeld. Verder is voor twee specifieke natuurtypes (duinlandschap en hellingbos) op basis van een systeemanalyse bepaald hoe en in welke mate de bodemtemperatuur verandert en welke invloed dit heeft op de vegetatieontwikkeling. Dit maakt dat we op basis van het literatuuronderzoek, modelberekeningen en systeemanalyse voor een aantal onderwerpen duidelijke conclusies kunnen trekken. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste aspecten weergegeven en is er een aanzet gegeven voor onderwerpen voor vervolgonderzoek.

Stijgt de bodemtemperatuur sneller op kale grond in vergelijking met grond die begroeid is met gras?

Ja, de relatief beperkte metingen in kale grond geven aan dat de bodemtemperatuur van kale grond ca. 30% sneller stijgt dan de grond die met gras begroeid is. Ook worden er bij kale gronden op grotere diepte grotere veranderingen waargenomen. Wellicht belangrijker dan de gemiddelde temperatuurverandering is het grote verschil in temperatuurdynamiek. Zo worden er bij kale grond in de zomer bodemtemperaturen van boven de 50°C gemeten, terwijl die voor grasland niet boven de 25°C uitkomen. In de nacht kan het omgekeerde optreden en koelt de kale grond meer af. De metingen geven een indicatie dat op kale grond sprake is van een natuurlijk hitte-eiland (bekend fenomeen vanuit de stad) waarbij – door de accumulatie van warmte en de versterkte uitdroging – de bodemtemperatuur sterker stijgt.

Stijgt de bodemtemperatuur in bossen sneller dan in grasland?

Nee, op basis van de relatief beperkte metingen aan één type bos (naaldbomen) blijkt dat de bodemtemperatuur in dit type bos vergelijkbaar is met de bodemtemperatuur gemeten onder grasland. Internationaal onderzoek geeft aan dat de bodemtemperatuur onder dichte en vochtige bossen mogelijk minder snel zal gaan stijgen. Verder zal mogelijk door het aanpassen van het beheer (minder kap) de luchttemperatuur in bossen minder snel zijn gestegen, met als gevolg ook een minder sterke stijging van de bodemtemperatuur.

Wat is de invloed van vegetatie op de bodemtemperatuur?

De bodemtemperatuurmetingen in Nederland zijn gemeten onder kort gemaaid gras, kale grond en naaldbos en geven daarmee een beperkt beeld van de invloed van diverse vegetatietypes. Berekeningen geven echter aan dat het type vegetatie sterk van invloed is op de seizoensmatige en dagelijkse bodemtemperatuurveranderingen, maar beperkter op de langjarige veranderingen.

Zal de bodemtemperatuur de komende decennia verder stijgen?

Metingen tonen aan dat de bodemtemperatuur de afgelopen veertig jaar tussen de 1.2 en 1.8°C is toegenomen en dat deze een sterke correlatie heeft met de luchttemperatuur (Bakema et al., 2022). Indien de relatie luchttemperatuur-bodemtemperatuur gelijk blijft, is de verwachting dat de bodemtemperatuur de komende dertig jaar nog met 1.2°C zal gaan toenemen. Dit maakt dat de bodemtemperatuur in 2050 ten opzichte van 1980 2.7°C hoger zal liggen.

Kunnen we de bodemtemperatuur berekenen voor verschillende bodems en vegetatietypes?

De metingen aan bodemtemperaturen zijn beperkt tot een paar bodems en enkele vegetatietypes. Met het model SWAP-WOFOST is het mogelijk voorspellingen te doen voor specifieke bodems en vegetatietypes. Met name de keuze van de bovenrand van het model (luchttemperatuur of warmteflux) is sterk bepalend voor het eindresultaat. Door de beperkte aanwezigheid van metingen is het parametriseren van het model voor diverse vegetatietypes complex en leidt met name voor de niet-grasvegetatie nog tot onnauwkeurige

resultaten. De structuur van de vegetatie lijkt daarbij veel invloed te hebben, waarbij ook een ruige grasvegetatie mogelijk al andere resultaten oplevert ten opzichte van een kort gemaaid grasland.

Welke rol speelt bodemtemperatuur in de natuurontwikkeling?

Bodemtemperatuur is niet zozeer sturend voor, maar volgend op de natuurontwikkeling boven het maaiveld. Het beheer van die natuur is doorslaggevend voor veranderingen in bodemtemperatuur en de mate waarin luchttemperatuur effect heeft op de temperatuur van de bovenste bodemlagen. Door het kort en open houden van de vegetatie krijgt het milieu meer vat op de bodemtemperatuur, waarbij de temperatuursextremen worden vergroot. In een grasland kan dit door overstuiven, plaggen of zelfs gewoon maaien worden bewerkstelligd. Kappen en snoeien hebben hetzelfde effect in bossen en struwelen. Wanneer een vegetatie de kans krijgt om dichter te worden, is het tegenovergestelde effect zichtbaar.

Heeft de stijging van de bodemtemperatuur een significant effect op de vegetatieontwikkeling?

De successie in vegetatie is inherent verbonden aan de ontwikkeling in de bodemtemperatuur. Daarom zijn de gevolgen van een stijging van de bodemtemperatuur op natuurontwikkeling en de oorzaken van veranderingen in bodemtemperatuur moeilijk van elkaar te onderscheiden. Als er wordt uitgegaan van een stijging van de bodemtemperatuur die in enige mate de stijging van de luchttemperatuur volgt, zal dit in het algemeen de successie in vegetatie versnellen en daarmee, zonder ingrijpen, de stijging van bodemtemperatuur op termijn afremmen.

Wat is de invloed van de stijgende bodemtemperatuur op het voorkomen van specifieke soorten?

Met name in de vroege stadia van successie zal een stijgende bodemtemperatuur het voorkomen van soorten doen versmallen. Bodemtemperatuurverandering zal dus voornamelijk consequenties hebben voor de pioniermilieus, waar successie, kieming en overleving nog door de aanwezige bodemtemperatuur worden beïnvloed. Zodra er een vegetatie ontstaat, zal die direct effect hebben op de bodemtemperatuur.

Moet het natuurbeheer rekening houden met autonome bodemtemperatuurverandering?

Door de alom aanwezige feedbackloop van vegetatie op de bodemtemperatuur is er eigenlijk geen sprake van een autonome verandering van de bodemtemperatuur los van de omgevingstemperatuur. Een vegetatiestructuur zal een remmend effect hebben op additionele opwarming door bijvoorbeeld instraling. Een natuurbeheerder kan dus invloed uitoefenen op de bodemtemperatuur via de vegetatie, maar daarbij zal de maatregel op de vegetatie leidend zijn. Hoogstens op microschaal kunnen ingrepen uitgevoerd worden om de bodemtemperatuur gunstiger te maken voor bijvoorbeeld insecten. Maar de algemene maatregel zal hierbij het openmaken of verwijderen van de vegetatie zijn.

De verandering van bodemtemperatuur moet een grotere rol krijgen in onderzoek naar klimaatverandering.

Tijdens het onderzoek is duidelijk geworden dat bodemtemperatuur invloed heeft op de diverse biotische en abiotische processen. De mate waarin en hoe deze gaan wijzigen onder invloed van klimaatverandering zal beter onderzocht moeten worden. Zeker wanneer het betrekking heeft op de invloed van bodemtemperatuurverandering op de ontwikkeling van natuurgebieden en de agrarische productie.

Aanvullend onderzoek nodig om de kennis over invloed van bodemtemperatuurstijging op de natuurontwikkeling vergroten?

Dit onderzoek (zie voor het eerste deel van het onderzoek Bakema et al., 2022) is een vervolg om de kennis over de ontwikkeling van de bodemtemperatuur, de effecten op de biotische en abiotische processen in de bodem en de gevolgen voor de natuurontwikkeling te vergroten. De belangrijkste vervolgvragen liggen bij de effecten van seizoenverschuivingen op de biotische processen en het bepalen van de bodemtemperatuurstijging en de gevolgen daarvan in specifieke natuurgebieden:

- De langjarig bodemtemperatuurmetingen zijn nu alleen beschikbaar van vier KNMI-sites met grasland en een tweetal WUR-sites (gras/braak, naaldbos). Het is belangrijk om ook bodemtemperatuur te gaan meten in verschillende natuurgebieden en te kijken hoe deze zich ontwikkelt onder diverse omstandigheden.
- In dit onderzoek is gekeken naar de gemiddelde stijging van de bodemtemperatuur en niet naar eerder optreden van een bepaalde temperatuur. Op basis van literatuuronderzoek blijkt dat deze situaties interessant kunnen zijn vanwege het eerder kiemen van zaden in het voorjaar. Ook is bekend dat bepaalde plantensoorten (eenjarigen en pioniersoorten) een bepaalde minimale bodemtemperatuur (koude-shock)

nodig hebben om te kiemen. Nader onderzoek kan duidelijk maken of er een snellere opwarming van de bodem in het voorjaar zichtbaar is en hoe die zich de komende jaren kan ontwikkelen.

- Omdat bodemtemperatuur nu doorgaans beschouwd wordt als een gevolg van de vegetatie in plaats van andersom, zou het nuttig zijn om meer metingen door het land uit te voeren, waar de bodemtemperatuurveranderingen onder verschillende begroeiingstypen gevolgd worden. Hierbij zou bijvoorbeeld aangesloten kunnen worden bij de tijdreeksen binnen het Landelijk Meetnet Flora, waarbij bodemtemperatuurgegevens direct gekoppeld kunnen worden aan begroeiingstype, vegetatie en abiotiek ter plekke. Mogelijk dat er ook aangesloten kan worden bij andere soortgroepen binnen het Netwerk Ecologische Monitoring (NEM).
- Voor agrarische systemen, waar een open pioniersituatie in stand wordt gehouden, zou bodemtemperatuur wel een direct effect kunnen hebben op de groei en kieming van gewassen. De geringe aanwezigheid van de microklimaten op intensief beheerde akkers zou een analyse van de effecten van een opwarming van de bodemtemperatuur beter mogelijk moeten maken.
- De bodemtemperatuur is een belangrijke factor in de fysiologie van bodemprocessen. Het zou daarom interessant zijn om bodemtemperatuur ook in natuurlijke situaties te kunnen koppelen aan de snelheid van successie en ongewenste processen als verruiging en vergrassing. Zo is er nog maar weinig kennis over de effecten op bodemschimmels.
- Bovendien speelt de bodemtemperatuur mee in de droogtegevoeligheid van gebieden. Meer onderzoek naar hoe bodemtemperatuur, bodemvocht en vegetatie samenhangen op landschapsschaal zou meer inzicht geven in waterbufferende maatregelen.

Meet bodemtemperatuurmetingen op alle KNMI-sites en bij bodemonderzoeken.

De bodemtemperatuur is een gefilterde luchttemperatuur: uitgedempt en vertraagd maakt het langjarige trends in luchttemperatuur beter zichtbaar. Dit pleit ervoor om minimaal bij alle bestaande KNMI-sites ook de bodemtemperatuur tot 1,5 m -mv te gaan meten. Daarnaast zou bij alle veldonderzoeken op het gebied van bodemfysica bodemkwaliteit, veenoxidatie, koolstofvastlegging etc. de bodemtemperatuur moeten worden gemeten.

Meer integraal onderzoek nodig aan warmte en water in de bodem-gewas-atmosfeer dynamiek.

In dit rapport ligt de focus op bodemtemperatuur als afzonderlijke factor. Daarmee wordt wellicht gesuggereerd dat bodemtemperatuur het enige aspect is dat een rol speelt in het bodem-gewas-atmosfeersysteem. Op basis van een review komen Lesk et al. (2022) tot een synthese waarin wordt gesteld dat er dringende behoefte is aan een integraal begrip van warmte en water in de bodem-gewas-atmosfeerdynamiek om de risico's beter te begrijpen en om de teeltsystemen op passende wijze aan te passen aan deze samengestelde klimaateffecten. Dit kan uiteraard op verschillende schaalniveaus bekeken worden: niet alleen op langetermijnschaal, maar ook kan gekeken worden naar effecten van extreme gebeurtenissen, zoals de droge en warme zomer van 2018 (zie bijv. Van Oort et al., 2022). Meer specifiek voor het bodemsysteem zijn de volgende onderzoeksvragen belangrijk:

- Kan een betere kwantificering van de bodemverdamping in de bodem bijdragen aan een verbetering van de simulaties van de water- en warmtebalans?
- Kan de temperatuurafhankelijkheid van de waterretentie- en doorlatendheidseigenschappen van de bodem van belang zijn in simulaties van de water- en warmtebalans?

Literatuur

- APSIM. <https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/soiltemp/>
- Bakema, G., J. Bloem, M. Heinen, M. Knotters en N. van Rooijen, 2022. De invloed van klimaatverandering op de bodemtemperatuur, 2022. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3154.
- Bobbink, R., Bijlsma, R. J., Hommel, P. W. F. M., Schaminée, J. H. J., & de Waal, R. W. (2008). Preadvies hellingbossen in Zuid-Limburg: eindconcept (No. 2008-94-O). Ministerie LNV, Directie Kennis.
- Brownmag onwuka, Brown Mang. 2018. Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth. *Advances in Plants & agriculture research*. Vol 8 1- 2018.
- Chung, S.-O., R. Horton. 1987. Soil heat and water flow with partial surface mulch. *Water Resources Research* 23(12): 2175-2186.
- COUP. <http://www.coupmodel.com/default.htm>
- DAISY. https://daisy.ku.dk/technical-manual/Ch_5_Heat_Transport_alone.pdf
- de Bruin, H.A.R., A.A.M. Holtslag. 1982. A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept. *Journal of Applied Meteorology* 21: 1610-1621.
- Heinen, M., F. Brouwer, K. Teuling en D. Walvoort. 2021. BOFEK 2020 – Bodemfysische schematisatie van Nederland. Update bodemfysische eenhedenkaart. WENR rapport 3056, Wageningen Environmental Research. <https://edepot.wur.nl/541544>
- Hommel, P. W. F. M., Bijlsma, R. J., Eichhorn, K. A. O., Kemmers, R. H., den Ouden, J., Schaminée, J. H. J., ... & Willers, B. J. C. (2010). Mogelijkheden voor herstelbeheer in hellingbossen op kalkrijke bodem in Zuid-Limburg: resultaten eerste onderzoekfase. Alterra.
- Hipel, K.W. en I.A. McLeod, 1994. Time series modelling of water resources and environmental systems. Elsevier, Amsterdam.
- Holtslag, A.A.M., H.A.R. de Bruin. A.P. van Ulden. 1981. Estimation of the sensible heat flux from standard meteorological data for stability calculations during daytime. In: C. De Wispelaere (ed.), *Air Pollution Modeling and Its Application I*, pp. 401-407, Plenum Press, New York.
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (2023) Website: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uihttps://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/zomers-waddenweer#:~:text=Strandgangers%20weten%20dat%20zand%20brandend,voelbare%20warmte%20op%20de%20Waddeneilanden.tleg/zomers-waddenweer#:~:text=Strandgangers%20weten%20dat%20zand%20brandend,voelbare%20warmte%20op%20de%20Waddeneilanden>
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, R.P. Bartholomeus, P. Groenendijk, M. Heinen, R.F.A. Hendriks, H.M. Mulder, I. Supit and P.E.V. van Walsum. 2017. SWAP version 4. Theory description and user manual. Report 2780, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/416321>, <https://swap.wur.nl/>
- Lembrechts, J. J., Van den Hoogen, J., Aalto, J., Ashcroft, M. B., De Frenne, P., Kemppinen, J., ... & Hik, D. S. (2022). Global maps of soil temperature. *Global Change Biology*, 28(9), 3110-3144.
- Lesk, C., W. Anderson, A. Rigden, O. Coast, J. Jägermeyr, S. McDermid, K.F. Davis and M. Konar. 2022. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change. *Nature Reviews Earth & Environment* 3: 872-889. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00368-8>
- Li, X. (2005). Influence of variation of soil spatial heterogeneity on vegetation restoration. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48(11), 2020-2031.
- Ministerie LNV (2008) Sub-Atlantische en midden-Europese wintereikenbossen of eikenhaagbeukenbossen behorend tot het Carpinion betuli (H9160), Profielendocument Natura 2000
- Moene, A.F., J.C. van Dam. 2014. Transport in the atmosphere-vegetation-soil continuum. Cambridge University Press, New York.
- Reinhart, K. O., Royo, A. A., Kageyama, S. A., & Clay, K. (2010). Canopy gaps decrease microbial densities and disease risk for a shade-intolerant tree species. *Acta Oecologica*, 36(6), 530-536.
- Renc, A., Łupikasza, E., & Błaszczuk, M. (2022). Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. *Ecological Indicators*, 142, 109181.

-
- Šimůnek, J., M.Th. van Genuchten and M. Šejna. 2020. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical Manual. Version 3.03. PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Schaminée, J.H.J (2022). Nature in a crowded country episode VI: estuarine landscapes, Radboud University
- Smits, N., Bobbink, R., Kuiters, L., van Noordwijk, T., Schaminée, J., & Verberk, W. (2009). Sleutelfactoren en toekomstperspectief voor herstel van het Limburgse heuvelland. *De Levende Natuur*, 110(3), 111-115.
- SynBioSys (2022) www.synbiosys.alterra.nl/synbiosysnl
- Ten Berge, H.F.M. 1986. Heat and water transfer at the bare soil surface. PhD Thesis, Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Ten Berge, H.F.M. 1990. Heat and water transfer in bare topsoil and the lower atmosphere. PUDOC, Wageningen.
- van der Linden, S.J.A., M.T. Kruis, O.K. Hartogensis, A.F. Moene, F.C. Bosveld, B.J.H. van de Wiel. 2022. Heat Transfer Through Grass: A Diffusive Approach. *Boundary-Layer Meteorology* (2022) 184:251–276. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00708-7>
- van Oort, P.A.J., B.G.H. Timmermans, R.L.M. Schils and N. van Eekeren. 2022. Recent weather extremes and their impact on crop yields of the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 142, 126662. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126662>
- Way, R. G., & Lapalme, C. M. (2021). Does tall vegetation warm or cool the ground surface? Constraining the ground thermal impacts of upright vegetation in northern environments. *Environmental Research Letters*, 16(5), 054077.

Bijlage 1 Literatuur over bovenrandvoorwaarde voor bodemtemperatuur

COUP

Bron: <http://www.coupmodel.com/default.htm>

Het COUP-model is ontwikkeld voor Scandinavische omstandigheden. Daar spelen vorst en sneeuw een belangrijke rol in de water- en warmtebalans. Warmtetransport en de berekening van de temperatuur in de bodem wordt beschreven door een balansvergelijking waarin naast T-diffusie (zoals ook in SWAP) ook convectie (bijvoorbeeld via snelle infiltratie van smeltende sneeuw of via neerslag met afwijkende T) en latente warmte (bijvoorbeeld via bevriezing en dooien van ijs) een rol spelen. Wanneer we die convectie en latente termen weglaten, dan is de beschrijving identiek aan die van SWAP.

Voor de bovenrandvoorwaarde voor warmte hanteert COUP een flux randvoorwaarde. Deze is gegeven door

$$q_k(0) = k_{ho} \frac{(T_s - T_1)}{0.5\Delta z_1} + C_w (T_a - \Delta T_{Pa}) q_{in} + L_v q_{vo} \quad (6)$$

hierin is

q_k	warmteflux aan maaiveld
k_{ho}	warmtegeleiding van OS aan maaiveld
T_s	oppervlaktetemperatuur
C_w	warmtecapaciteit van water
T_a	bodemtemperatuur van het eerste rekenlaagje
ΔT_{Pa}	temperatuurverschil tussen lucht en infiltrerend (regen)water;

optioneel gelijk te stellen aan T_s

q_{in}	infiltratiesnelheid
q_{vo}	waterdamp snelheid
L_v	latente warmte

Wanneer we de convectie-term en de latente-term weglaten, blijkt de eerste term aan de rechterzijde over. Echter, dan moet wel een waarde bekend zijn voor de oppervlaktetemperatuur.

DAISY

Bron: https://daisy.ku.dk/technical-manual/Ch_5_Heat_Transport_alone.pdf

DAISY beschouwt zowel diffusie als convectie in de warmtebalans; latente warmte wordt buiten beschouwing gelaten.

Als bovenrandvoorwaarde wordt de oppervlaktetemperatuur beschouwd. Deze wordt benaderd door de luchttemperatuur (tenzij er sneeuw aanwezig is). Uurlijkse luchttemperaturen worden rechtstreeks gebruikt. Indien alleen dagelijkse minimum (T_{min}) en maximum (T_{max}) temperaturen bekend zijn, wordt een dagelijks ritme variatie verondersteld: T_{min} treedt op vlak voor zonsopkomst en T_{max} om 15:00; met kleine variaties hierop (zie manual).

APSIM

Bron: <https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/soiltemp/>

APSIM gaat in de basis uit van een diffusie beschrijving voor temperatuur (zoals SWAP).

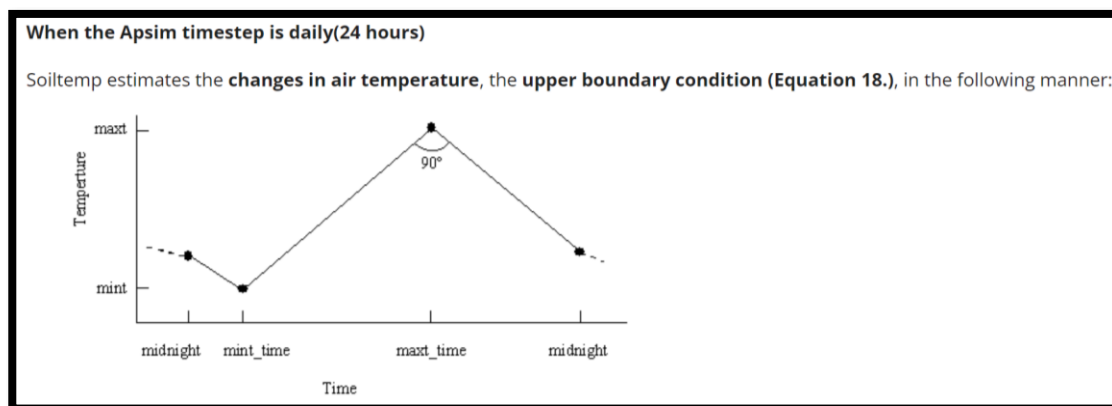
Voor de bovenrandvoorwaarde stelt APSIM dat bij het oplossen van een nieuwe T-verdeling voor de eerste rekenlaag de term met bekende informatie (in hun notatie d_1) als volgt wordt berekend

$$d_1 = \left\{ T_{i-1}^j (K_{i-1} (1 - \eta)) + T_i^j (-K_i (1 - \eta) - K_{i-1} (1 - \eta) + H_i) + T_{i+1}^j (K_i (1 - \eta)) \right\} + \eta K_{BL} T_{air} - R_n + E_{soil} \quad (7)$$

hierin is

i	laagnummer
j	tijdstap niveau
T	temperatuur
K	warmtegeleidingscoëfficiënt
η	factor die mate van voorwaartse/achterwaartse middeling beschrijft
H_1	maat voor warmtecapaciteit van laag 1
K_{BL}	geleiding van de grenslaag ($\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$): user input
T_{air}	temperatuur aan bovenkant grenslaag
R_n	netto input straling ($\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$)
E_{soil}	energieverlies via verdamping aan maaiveld ($\text{J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$)

Normaal gesproken wordt binnen een dag lineair geïnterpoleerd tussen de minimum- en maximumluchttemperatuur volgens onderstaande figuur:



Voor $\eta = 1$ geldt:

$$d_1 = \eta K_{BL} T_{air} - R_n + E_{soil} \quad (8)$$

Hoe groter K_{BL} , des te groter het verschil tussen luchttemperatuur en temperatuur aan bodemoppervlak. Indien onbekend, dan kan als startwaarde $K_{BL} = 20 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ gebruikt worden.

Voor een begroeide en een kale grond situatie is het aannemelijk dat K_{BL} , R_n en E_{soil} verschillend zullen zijn. Alleen de mate waarin is onbekend.

HYDRUS

Bron: Šimůnek et al. (2020).

De atmosferische bovenrandvoorwaarde voor temperatuur, T_0 , wordt in Hydrus beschouwd via een sinusfunctie:

$$T_0 = \bar{T} + A \sin\left(\frac{2\pi t^*}{t_p} - \frac{7\pi}{12}\right) \quad (9)$$

hierin

t_p	sinus periode, typisch 1 dag
$\bar{T}$	gemiddeld oppervlaktetemperatuur gedurende periode t_p
A	amplitude van de sinusgolf
t^*	lokale tijd binnen periode t_p

De tweede term in de sinusfunctie zorgt ervoor dat de hoogste temperatuur optreedt om 13:00. Als gebruiker moet je dan nog wel de waarden voor $\bar{T}$ en A opgeven.

Verkenning warmteflux bovenrandvoorwaarde gebaseerd op De Bruin & Holtslag (1982)

Uitgangspunt van de analyse in De Bruin & Holtslag (1982; zie ook Holtslag et al., 1981) is de algemene warmtebalans gegeven door

$$R_n + H + LE + G = 0 \quad (10)$$

hierin is

R_n	de instraling (W m^{-2})
H	voelbare warmteflux (W m^{-2})
LE	latente warmteflux (W m^{-2})
G	warmteflux aan maaiveld (W m^{-2})

In De Bruin & Holtslag (1982) wordt een eenvoudig model gepresenteerd om de warmteflux G (W m^{-2}) aan maaiveld te schatten. Er wordt gesteld dat deze warmteflux gelijk is aan een fractie van de netto-straling Q^* (W m^{-2}) volgens

$$G = c_G Q^* \quad (11)$$

Op basis van metingen stellen zij dat c_G gelijk is aan 0,1 voor 10 cm hoog gras. Volgens Moene & Van Dam (2014) is c_G iets lager voor hogere gewassen zoals mais en granen (bijv. 0.07) en is c_G in de range 0.1-0.5 voor gedeeltelijke bedekte grond. Wel moet worden opgemerkt dat De Bruin & Holtslag (1982) deze factor hebben afgeleid alleen voor perioden tussen zonsopkomst en zonsondergang. In het vervolg gaan we er echter van uit dat dit voor de volledige dag geldt.

In hun bijlage geven De Bruin en Holtslag eenvoudige relaties om Q^* te berekenen op basis van de gemeten kortegolfstraling, luchttemperatuur en bewolkingsgraad. De netto-straling Q^* is gegeven als

$$Q^* = (1 - A)K^+ + L^+ - L^- \quad (12)$$

hierin is

A	albedo van het grondoppervlak; bijvoorbeeld 0.25 voor kort gras
K^+	inkomende korte-golf straling (W m^{-2})
L^+	inkomende lange-golf straling (W m^{-2})
L^-	uitgaande lang-golf straling (W m^{-2})

Moene & Van Dam (2014) geven voor bodems waarden voor de albedo A in de range 0.1-0.4: donkere natte bodems: 0.1, nat zand: 0.1-0.25; droog zand: 0.2-0.4; natte klei: 0.1-0.2; droge klei: 0.2-0.35.

De inkomende kortegolfstraling wordt door weerstation gemeten.

Voor L^+ geldt:

$$L^+ = 5.31 \cdot 10^{-13} (273 + T)^6 + 60N \quad (13)$$

hierin is

T	luchttemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
N	bewolkingsgraad (0..1)

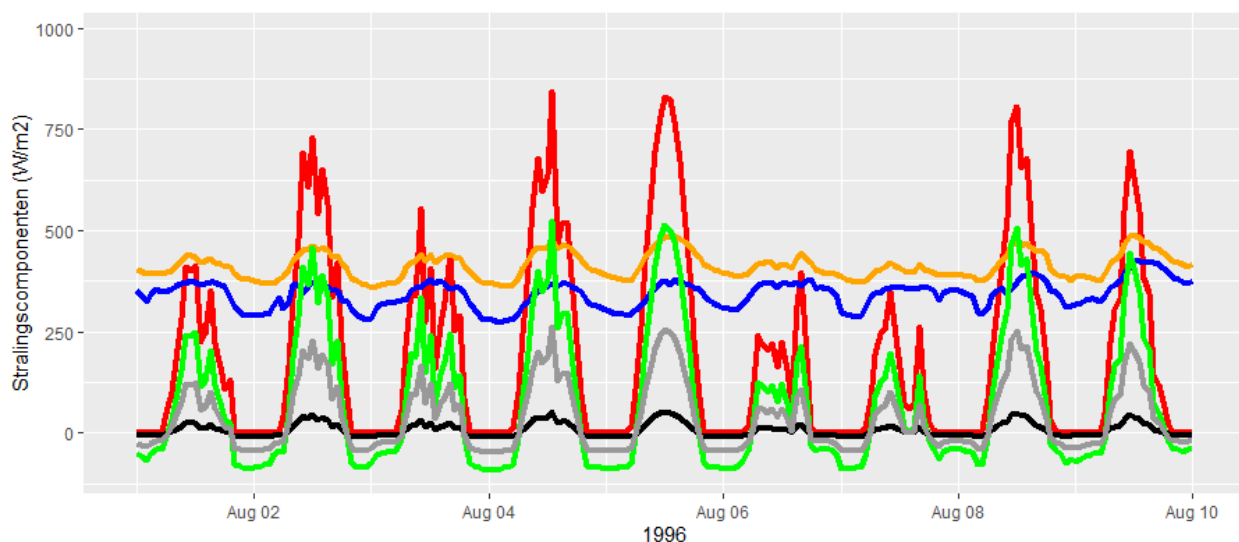
Voor L^- geldt:

$$L^- = \sigma(273 + T)^4 + c(1 - A)K^+ \quad (14)$$

hierin is

σ	constante van Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
N	bewolkingsgraad (0..1)
c	een constante met voorgestelde waarde van $c = 0.07$

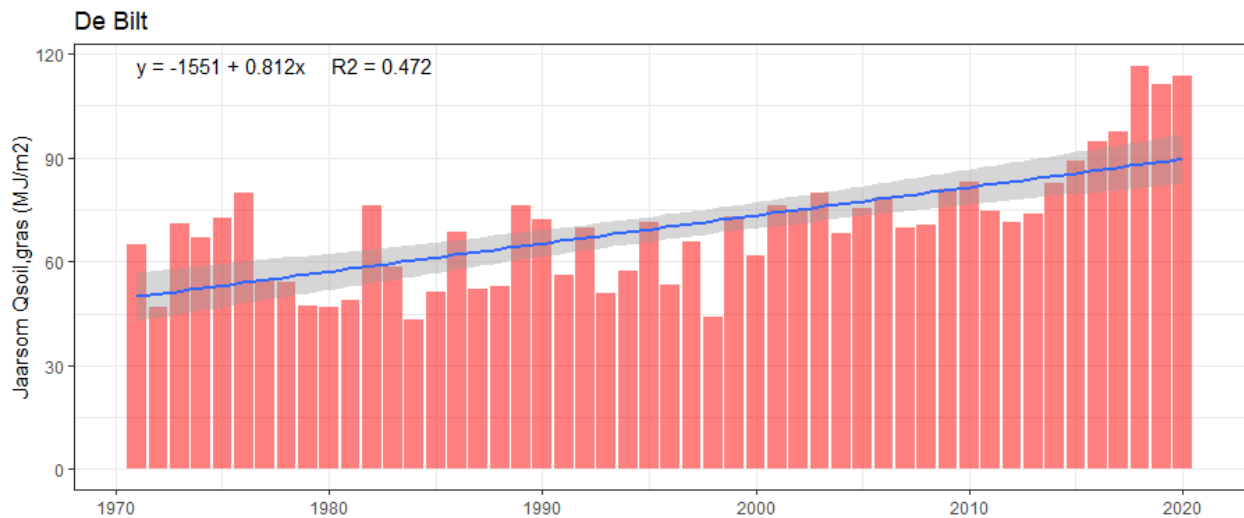
Voor een willekeurige periode in 1996 zijn de diverse uurlijkse stralingscomponenten in Figuur B1-1 weergegeven. Overdag zijn alle componenten positief, en 's-nachts zijn Q^* en G negatief.



Figuur B1-1 Uurlijkse stralingscomponenten berekend volgens vergelijkingen (6-9) voor enkele dagen in augustus 1996; rood: K^+ , blauw: L^+ , oranje: L^- , groen: Q^* , zwart: G voor gras ($A = 0.25$, $c_G = 0.1$), grijs: G voor kale bodem ($A = 0.25$, $c_G = 0.5$).

Cumulatief op jaarbasis geldt dat er een positieve netto instraling is en dus ook een positieve netto warmteflux de bodem in (immers $c_G > 0$). Deze waarden nemen toe in de periode 1971-2020, zoals in Figuur B1-2 is te zien (alleen voor gras). Er is een toenemende trend in de berekende warmtefluxen zichtbaar. Wanneer deze warmteflux als randvoorwaarden in SWAP toegepast zal worden, leidt dit tot een toename van de warmte-inhoud in de bodem en dus een toename in de bodemtemperatuur. Dat is dan wel consistent met de waarneming dat de luchttemperatuur toeneemt in dezelfde periode, en dat ook gemeten bodemtemperaturen toenemen in dezelfde periode. Alleen is nog niet bekend of bij toepassing van deze warmteflux-randvoorwaarde de vervolgens gesimuleerde bodemtemperaturen in de juiste range gesimuleerd worden.

Merk op dat de uitgevoerde berekeningen zijn gedaan op basis van uurlijkse waarnemingen. Voor klimaatscenario Wh zijn, voor zover bekend, alleen dagelijkse waarden bekend en zeer waarschijnlijk geen waarden voor de bewolkinggraad.



Figuur B1-2 Jaarsom van de berekende warmteflux aan maaiveld voor een met gras begroeide situatie voor de periode 1971-2020.

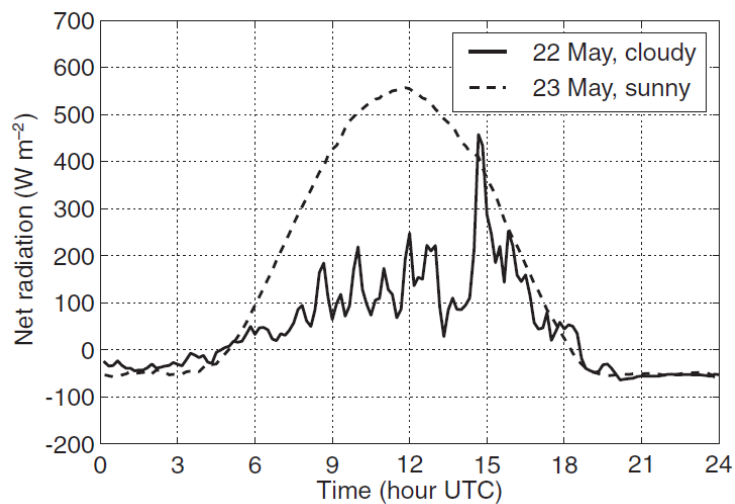
Voor een met kort gras begroeide situatie geldt dat $A = 0.25$ en $c_G = 0.1$. Voor een volledig kale bodem (bijv. droog zand) geldt dat de albedo in de range 0.2-0.4 ligt (bij benadering $A = 0.25$) en zouden we c_G kunnen stellen op 0.5. In dat geval zal de warmteflux voor kale bodem dus 5x groter zijn dan voor grasland.

Verificatie

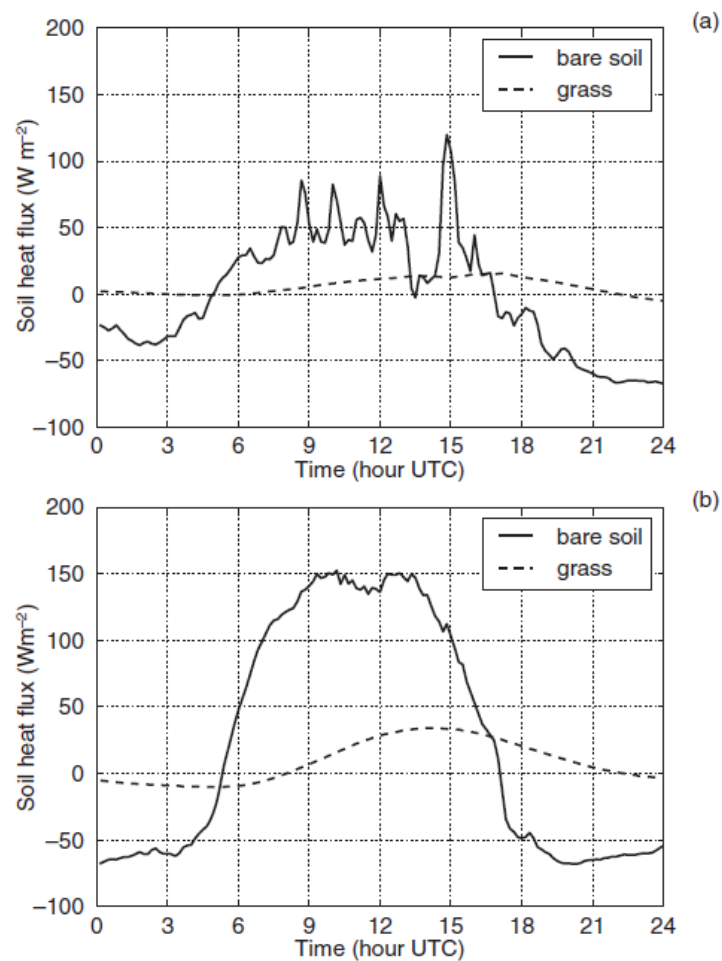
De hierboven geschetste inschatting van de warmteflux aan maaiveld past kwalitatief bij gemeten netto-straling en warmtefluxen net onder maaiveld (als proxy voor warmteflux aan maaiveld) zoals getoond in Moene & Van Dam (2014).

De netto-straling is afhankelijk van de bewolkingssituatie en is positief overdag en negatief in de nacht (Figuur B1-3), we zien vergelijkbare patronen voor de gemeten warmteflux op 5 cm onder maaiveld (Figuur B1-4). Duidelijk valt op dat de warmteflux nabij maaiveld verschilt voor een met gras begroeide situatie en voor een kale bodem.

Kwalitatief is het concept van De Bruin & Holtslag (1982) in overeenstemming met deze metingen. Daarmee is niet gezegd dat het concept juist is. Maar mogelijk kan het toegepast worden om een eerste indicatie te krijgen wat de gesimuleerde verschillen zijn van de bodemtemperatuur voor begroeide en niet-begroeide situaties.



Figuur B1-3 Netto-straling voor locatie Haarweg (Wageningen) op een bewolkte en zonnige dag in mei 2007 (bron: Moene & van Dam, 2014; hun Figuur 2.16).



Figuur B1-4 Netto warmteflux op 5 cm onder maaiveld straling voor locatie Haarweg (Wageningen) voor met gras begroeide plot en een plot met kale bodem op a) op een bewolkte en b) zonnige dag in mei 2007 (bron: Moene & van Dam, 2014; hun Figuur 2.26).

Ten Berge (1986; 1990)

Hein ten Berge (1986; zie ook Ten Berge, 1990) beschrijft in zijn proefschrift zeer gedetailleerd over de warmtebalans in de bodem en de grenslaag boven het maaiveld. Uitgangspunt is de algemene warmtebalans (gelijk aan die hierboven gegeven). In zijn analyse over allerlei processen in de grenslaag wordt onder meer de temperatuur aan maaiveld ingeschat waardoor vervolgens de warmteflux aan maaiveld geschat kan worden uit

$$G = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (15)$$

Deze aanpak is fysisch onderbouwd en zal beter zijn dan de eenvoudige berekening die De Bruin & Holtslag (1982) beschreven. Echter, ook in de aanpak van Ten Berge komen enkele onzekere coëfficiënten voor in de gedetailleerde aanpak, zodat de uitkomsten niet exact zullen zijn.

Chung & Horton (1987)

Chung & Horton (1987) beschrijven een model voor bodemtemperatuur (gekoppeld aan watertransport) bestaande uit een diffusiecomponent en een convectiecomponent. Bij bespreking van de bovenrandvoorwaarde stellen zij dat de warmteflux aan maaiveld onbekend is. Daarom beschouwen ze de algemene warmtebalans en geven uitdrukkingen voor alle componenten hiervan.

$$R_n - H - LE - G = 0 \quad (16)$$

Zowel R_n als G zijn positief naar beneden en H en LE zijn positief naar boven. De termen worden als volgt uitgeschreven.

$$R_n = (1 - A)R_g + R_l - \varepsilon \sigma (T_s + 273.16)^4 \quad (17)$$

hierin is

A	albedo van het grondoppervlak
R_g	gemeten globale straling (W m^{-2})
R_l	inkomende lange-golf straling (W m^{-2})
T_s	temperatuur aan bodemoppervlak ($^{\circ}\text{C}$)
ε	emissiviteit
σ	constant van Stefan-Boltzman: $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Der derde term in voorgaande vergelijking stelt de uitgaande langgolfstraling voor en wijkt iets af van de beschrijving door de Bruin & Holtslag (1982).

$$R_l = \sigma (T_a + 273.16)^4 \left[0.605 + 0.048 (1370 H_a)^{12} \right] \quad (18)$$

hierin is

T_a	luchttemperatuur ($^{\circ}\text{C}$)
H_a	luchtvochtigheid (kg m^{-3})

$$E = \frac{H_0 - H_a}{1000 r_a} \quad (19)$$

$$L = 2.4946 \cdot 10^9 - 2.247 \cdot 10^6 T_s \quad (20)$$

$$LE = L \cdot E \quad (21)$$

$$H_s = \rho_a c_{pa} \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (22)$$

hierin is

E	verdampingsflux (m s^{-1})
L	volumetrische latente warmte voor verdamping (J m^{-3})
H_0	absolute luchtvochtigheid van de lucht aan maaiveld
r_a	aerodynamische grenslaagweerstand tussen bodemoppervlak en de lucht (s m^{-1})
H_s	?
ρ_a	dichtheid van lucht (kg m^{-3})
c_{pa}	specifieke warmte van lucht ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Er wordt niet gemeld wat H_s is en wat de functie daarvan is in hun verdere berekeningen.

$$H_0 = H_0^* \exp\left(\frac{h_1}{46.97(T_s + 273.16)}\right) \quad (23)$$

$$r_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{2}{Z_0}\right)\right]^2}{0.16W_s} \quad (24)$$

hierin is

H_0^*	verzadigde luchtvochtigheid van de lucht aan maaiveld (kg m^{-3})
h_1	drukhoogte aan maaiveld (m) (kan niet groter dan nul zijn!)
Z_0	ruwheidslengte (m)
W_s	windsnelheid (m s^{-1})

$$H_a = 1.323 \frac{\exp\left(\frac{17.27T_d}{(T_d + 273.16)}\right)}{(T_a + 273.16)} \quad (25)$$

$$H_0^* = 1.323 \frac{\exp\left(\frac{17.27T_s}{(T_s + 273.16)}\right)}{(T_s + 273.16)} \quad (26)$$

hierin is

T_d	dauwpunttemperatuur ($^\circ\text{C}$)
-------	--

Ten slotte wordt de bodemflux gegeven door

$$G = \lambda \frac{T_s - T_2}{\Delta z} + \rho_s c_{ps} (T_s - T_s^0) \frac{\Delta z}{2\Delta t} \quad (27)$$

hierin is

λ	thermische geleiding van maaiveld ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
T_s	de onbekende temperatuur aan maaiveld ($^\circ\text{C}$)
T_s^0	de onbekende temperatuur aan maaiveld verkregen bij vorige tijdstap ($^\circ\text{C}$)
T_2	de bodemtemperatuur van de tweede rekenlaag ($^\circ\text{C}$)
Δz	afstand midden tweede rekenlaag tot aan maaiveld (m)
ρ_s	droge bulkdichtheid van de bodem (kg m^{-3})
c_{ps}	specifieke warmte van de bodem ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Δt	tijdstapgrootte (s)

Deze uitdrukking voor G bestaat uit een term die de warmteflux schat op diepte $\Delta z/2$ en een term die de verandering in opgeslagen warmte in de bodem boven diepte $\Delta z/2$ schat.

Deze aanpak vraagt om veel informatie over eigenschappen van de bodem en grenslaag, en levert dan nog steeds geen expliciete berekening van de warmteflux. De kernparameter T_s (temperatuur aan maaiveld) is een onbekende en dient iteratief opgelost te worden.

Van der Linden et al. (2022)

Van der Linden et al. (2022) analyseerden warmtetransport door de grasvegetatie heen. Zij hanteerden een vrij eenvoudig model hiervoor, maar geven aan dat dit ook zijn beperkingen heeft. Zo werd er bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de vochttoestand in het gewas of in de bodem. Desalniettemin konden er realistische parameterkalibraties worden uitgevoerd. Volgens hun aanpak trad er een duidelijke demping op van de warmteflux aan het bodemoppervlak in vergelijking tot de warmteflux die optrad aan de bovenkant van het gras (hun Figuur 9). Overdag lijkt het erop dat de warmteflux aan de bovenzijde van het gewas vrij goed gerelateerd is aan de netto-straling. In de nacht is die koppeling veel minder goed, omdat dan het gedrag van de turbulente voelbare warmte (H) en turbulente latente warmte (LE) nogal variabel kan zijn; er zijn nachten waarbij H en LE vrijwel nul zijn, zodat de warmteflux aan bovenzijde gewas gelijk is aan de (negatieve) netto-straling, maar er zijn ook nachten waarbij de warmteflux aan bovenzijde gewas op nul wordt geschat of ergens tussen nul en de netto-straling (zie hun Figuur 6).

Bijlage 2 Aanpassing numerieke schema bodemtemperatuur

In Bijlage 6 van Kroes et al. (2017) staat in detail uitgewerkt hoe het numerieke oplosschema voor bodemtemperatuur eruitziet. Voor de nieuwe warmteflux bovenrandvoorwaarde wordt voor het eerste rekenlaagje (top node) de volgende vergelijkingen geïntroduceerd.

$$C_1^{j+1/2} (T_1^{j+1} - T_1^j) = \frac{\Delta t^j}{\Delta Z_1} \left[Q_{top} - \lambda_{1+1/2}^{j+1/2} \frac{T_1^{j+1} - T_2^{j+1}}{\Delta Z_\ell} \right] \quad (1)$$

Of herschreven als

$$\left[C_1^{j+1/2} + \frac{\Delta t^j}{\Delta Z_1 \Delta Z_\ell} \lambda_{1+1/2}^{j+1/2} \right] T_1^{j+1} - \frac{\Delta t^j}{\Delta Z_1 \Delta Z_\ell} \lambda_{1+1/2}^{j+1/2} T_2^{j+1} = C_1^{j+1/2} T_1^j + \frac{\Delta t^j}{\Delta Z_1} Q_{top} \quad (2)$$

De benodigde coëfficiënten in de SWAP-code zijn dan gegeven als

$$\beta_1 = C_1^{j+1/2} + \frac{\Delta t^j}{\Delta Z_1 \Delta Z_\ell} \lambda_{1+1/2}^{j+1/2} \quad (3)$$

$$\gamma_1 = - \frac{\Delta t^j}{\Delta Z_1 \Delta Z_\ell} \lambda_{1+1/2}^{j+1/2} \quad (4)$$

$$f_1 = C_1^{j+1/2} T_1^j + \frac{\Delta t^j}{\Delta Z_1} Q_{top} \quad (5)$$

Indien gelijktijdig aan de bovenrand een opgelegde bodemtemperatuur en een opgelegde warmteflux als randvoorwaarde wordt beschouwd, dan geldt

$$Q_{top} = \lambda_{1/2}^{j+1/2} \frac{T_{top} - T_1^{j+1}}{\Delta Z_u} \quad (6)$$

Hiermee wordt in feite de bodemtemperatuur van het eerste rekenlaagje opgelegd, en volgt uit

$$T_1^{j+1} = T_{top} - \frac{\Delta Z_u}{\lambda_{1/2}^{j+1/2}} Q_{top} \quad (7)$$

De benodigde coëfficiënten in de SWAP-code zijn dan gegeven als

$$\beta_1 = 1 \quad (8)$$

$$\gamma_1 = 0 \quad (9)$$

$$f_1 = T_{top} - \frac{\Delta Z_u}{\lambda_{1/2}^{j+1/2}} Q_{top} \quad (10)$$

Bijlage 3 Trendanalyse

Deze bijlage geeft de details van de lineaire trendanalyses van maandgemiddelde, gedeseïzoenaliseerde bodemtemperaturen bij De Veenkampen en het Loobos.

Het tijdreeksmodel heeft de volgende structuur:

$$y_t = l_t + n_t$$

met

$$l_t = \beta_1 r_t$$

waarin r_t een reeks is van n waarden opklimmend van 1/12 tot en met $n/12$ met correctie voor het gemiddelde, en

$$n_t - c = \phi_1(n_{t-1} - c) + \dots + \phi_p(n_{t-p} - c) + \epsilon_t + \theta_1\epsilon_{t-1} + \dots + \theta_q\epsilon_{t-q}$$

Tabel B3-1 geeft de geschatte parameterwaarden en de resultaten van een significantietoets op de trendparameter β_1 (tweezijdig alternatief).

Tabel B3-1 Geïdentificeerde lineaire trendmodellen voor bodemtemperatuurreeksen bij De Veenkampen en het Loobos, geschatte parameterwaarden en tweezijdige significantietoets op trendparameter β_1 .

	$\hat{\phi}_1$	$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_{12}$	$\hat{c}$	$\hat{\beta}_1$	s.e. ($\hat{\beta}_1$)	p-waarde (tweezijdig)
Veenkampen, 5 cm, gras	0.2367		-0.3079	0.0169	0.0813	0.0309	0.0095
Veenkampen, 5 cm, kaal		0.1807	-0.2508	0.0156	0.1219	0.0385	0.0019
Veenkampen, 10 cm, gras	0.2993		-0.2704	0.0173	0.0628	0.0314	0.0477
Veenkampen, 20 cm, gras	0.3484		-0.2613	0.0144	0.0388	0.0307	0.2087
Veenkampen, 50 cm, kaal	0.2849	0.1541		0.0058	0.0832	0.0365	0.0243
Veenkampen, 100 cm, gras	0.5678	0.3180		0.0139	0.0448	0.0278	0.1105
Veenkampen, 150 cm, gras	0.6755	0.4488		0.0147	0.0441	0.0216	0.0433
Loobos, 3 cm	0.7633	-0.2579		-0.2700	0.0758	0.0348	0.0301
Loobos, 20 cm	0.8253	-0.2689	-0.0992	-0.2552	0.0723	0.0371	0.0518
Loobos, 50 cm	0.8044	-0.1974	-0.0965	-0.2310	0.0666	0.0317	0.0366
Loobos, 100 cm	0.7002			-0.2080	0.0595	0.0264	0.0250

Bijlage 4 Resultaten transfer-ruismodellering

Het TFN-model voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur heeft de volgende structuur:

$$y_t = y_t^* + n_t$$

waarin y_t^* de TF-component als gevolg van luchttemperatuur is en n_t de ruiscomponent die alle overige invloeden bevat.

De TF-component heeft de volgende algemene autoregressieve-moving average ARMA(r,s)-structuur:

$$y_t^* = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} x_t = \delta_1 y_{t-1}^* + \delta_2 y_{t-2}^* + \dots + \delta_r y_{t-r}^* + \omega_0 x_t + \omega_1 x_{t-1} + \dots + \omega_s x_{t-s}$$

(let op dat dit van de gebruikelijke notaties afwijkt wat betreft het teken van de MA-termen om het in overeenstemming te brengen met de arima-functie in R). B is de backward shift operator ($B^r x_t = x_{t-r}$).

De ruiscomponent heeft de volgende algemene SARIMA(p,d,q, P,D,Q,s)-structuur (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average):

$$\phi(B)\Phi(B^s)\nabla^d \nabla_s^D n_t = \theta(B)\Theta(B^s)\epsilon_t$$

In deze studie bleek de structuur van de ruis vaak te kunnen worden beschreven met een SARIMA(1,0,2, 0,1,1,12)-model:

$$n_t = n_{t-12} + \phi_1 n_{t-1} - \phi_1 n_{t-13} + \epsilon_t + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \theta_{12} \epsilon_{t-12} + \theta_1 \theta_{12} \epsilon_{t-13} + \theta_2 \theta_{12} \epsilon_{t-14}$$

Tabel B3-1 Parameterwaarden van de transfer-ruismodellen voor de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur onder gras bij De Veenkampen (standaardfouten tussen haakjes). Kalibratieperiode: juni 2011-februari 2022.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur			Ruiscomponent				
	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12	c
5	0.1456 (0.0443)	0.6959 (0.0287)	-	-0.4994 (0.3503)	0.8081 (0.3544)	0.2714 (0.1406)	-1.000 (0.3258)	.
10	0.2303 (0.0508)	0.6120 (0.0283)	-	-0.5441 (0.2006)	0.8843 (0.2093)	0.3689 (0.1256)	-0.8471 (0.1360)	.
20	0.3216 (0.0507)	0.5335 (0.0280)	-	-0.5639 (0.1529)	0.9398 (0.1700)	0.4443 (0.1335)	-0.7819 (0.1087)	.
100	0.4650 (0.0156)	0.1398 (0.0082)	0.2169 (0.0113)	0.4727 (0.1812)	0.2138 (0.1982)	0.2507 (0.1217)	-	-0.0316 (0.0556)
150	0.6851 (0.0370)	0.0168 (0.0062)	0.1077 (0.0059)	0.7911 (0.0995)	0.3785 (0.1472)	0.0407 (0.1459)	-0.8024 (0.1059)	-

Tabel B3-2 Parameterwaarden van de transfer-ruismodellen voor de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur onder kale grond bij De Veenkampen (standaardfouten tussen haakjes). Kalibratieperiode: juni 2011-februari 2022.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur			Ruiscomponent				
	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12	c
5	0.0422 (0.0440)	0.8866 (0.0380)	-	0.6703 (0.1904)	-0.3511 (0.1872)	-0.3782 (0.0883)	-0.8636 (0.1285)	-
50	0.4828 (0.0402)	0.4221 (0.0264)	-	0.7715 (0.4525)	-0.6436 (0.4517)	-0.1744 (0.0915)	-1.000 (0.2075)	-

Tabel B3-3 Parameterwaarden van de transfer-ruismodellen voor de relatie tussen lucht- en bodemtemperatuur in het Loobos (standaardfouten tussen haakjes). Kalibratieperiode: april 2005-december 2021.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur			Ruiscomponent				
	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	theta_3	Theta_12
3	0.3648 (0.0445)	0.3820 (0.0191)	-	0.8632 (0.0728)	-0.3665 (0.1100)	0.0972 (0.0878)	-0.0917 (0.0935)	-0.9196 (0.1204)
20	0.4082 (0.0486)	0.3459 (0.0195)	-	0.8677 (0.0693)	-0.3673 (0.1071)	0.0873 (0.0872)	-0.0862 (0.0925)	-0.8902 (0.0970)
50	0.5171 (0.0494)	0.2829 (0.0180)	-	0.7790 (0.0910)	-0.3511 (0.1248)	0.1188 (0.0938)	-	-0.9156 (0.1119)
100	0.3108 (0.1192)	0.2265 (0.0169)	0.0968 (0.0308)	0.7723 (0.0887)	-0.3187 (0.1212)	0.1463 (0.0908)	-	-0.8915 (0.1003)

Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Wageningen Environmental Research
Rapport 3256
ISSN 1566-7197



De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

To explore
the potential
of nature to
improve the
quality of life



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3256
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.200 medewerkers (6.400 fte) en 13.200 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

