



# De invloed van klimaatverandering op de bodemtemperatuur

Inventarisatie van de ontwikkeling van de bodemtemperatuur en de invloed op de biotische en abiotische processen in natuurgebieden

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



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH





# De invloed van klimaatverandering op de bodemtemperatuur

Inventarisatie van de ontwikkeling van de bodemtemperatuur en de invloed op de biotische en abiotische processen in natuurgebieden

Guido Bakema, Jaap Bloem, 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, maart 2022

---

Gereviewd door:  
Dorothee van Tol-Leenders, Strategische omgevingsadviseur

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

Rapport 3154  
ISSN 1566-7197

---

Bakema, G., J. Bloem, M. Heinen, M. Knotters en N. van Rooijen, 2022. *De invloed van klimaatverandering op de bodemtemperatuur; Inventarisatie van de ontwikkeling van de bodemtemperatuur en de invloed op de biotische en abiotische processen in natuurgebieden*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3154. 82 blz.; 32 fig.; 11 tab.; 94 ref.

Klimaatverandering is er de oorzaak van dat de bodemtemperatuur van de bovenste 100 cm de afgelopen veertig jaar met gemiddeld 1,5°C is toegenomen. Deze verhoging leidt tot een versnelling van diverse bodemprocessen zoals mineralisatie, denitrificatie en veenoxidatie. Bodemtemperatuur is 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. Nader onderzoek moet duidelijk maken in hoeverre de bodemtemperatuur in de toekomst verder gaat stijgen en wat de gevolgen daarvan zijn op de inrichting en het beheer van natuurgebieden.

Climate change has caused an increase of the soil temperature of the top 100 cm of 1.5 C on average over the past 40 years. This increase leads to an acceleration of various soil processes such as mineralization, denitrification and peat oxidation. Soil temperature is one of the many factors that play a role in the development of natural vegetation. There is also a strong interaction between the vegetation and the soil temperature, whereby the effect of vegetation on soil temperature exceeds that of soil temperature on vegetation. This means that soil temperature depends very much on the local microclimate. Further research should clarify the extent to which the soil temperature will continue to rise in the future and what the consequences will be for the design and management of nature reserves.

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

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/566436> of op [www.wur.nl/environmental-research](http://www.wur.nl/environmental-research) (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2022 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](http://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.

Wageningen Environmental Research Rapport 3154 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Duingrasland Vlieland, vegetatie die te maken heeft met forse temperatuurschommelingen (Nils van Rooijen)

---

# Inhoud

<b>Verantwoording</b>	<b>5</b>
<b>Woord vooraf</b>	<b>7</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>9</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>11</b>
<b>2 Tijdreeksanalyse bodem- en luchttemperatuur</b>	<b>13</b>
2.1 Inleiding	13
2.2 Exploratieve data-analyse	14
2.3 Trendanalyse	21
2.4 Conclusies tijdreeksanalyses	24
<b>3 Bodemprocessen en bodemtemperatuur</b>	<b>25</b>
3.1 Inleiding	25
3.2 Invloed bodemvocht op dynamiek bodemtemperatuur	25
3.3 Invloed bodemtemperatuur op dynamiek bodemvocht	26
3.3.1 Effect temperatuurgradiënt	26
3.3.2 Effect temperatuur op hydraulische eigenschappen	26
3.4 Invloed bodemtemperatuur op bodemprocessen	29
3.5 Conclusies bodemprocessen	31
<b>4 Natuurontwikkeling en bodemtemperatuur</b>	<b>33</b>
4.1 Inleiding	33
4.2 Bodemtemperatuur en plantengroei	34
4.3 Bodemleven en temperatuur	34
4.4 Natuurlijke Vegetatie en bodemtemperatuur	36
4.5 Bodemtemperatuur en zaden	37
4.6 Nederlandse vegetatie en bodemtemperatuur	39
4.7 Beheer hakhoutbossen Zuid-Limburg	42
4.8 Conclusies natuurontwikkeling	43
<b>5 Conclusie en vervolgonderzoek</b>	<b>44</b>
<b>Literatuur</b>	<b>48</b>
<b>Bijlage 1 Transfer-ruismodellering (TFN) maandgemiddelde temperaturen</b>	<b>53</b>
<b>Bijlage 2 Analyse SWAP-voorspellingen van bodemtemperatuur</b>	<b>59</b>
<b>Bijlage 3 Bodemtemperatuur en bodemprocessen</b>	<b>63</b>



---

# Verantwoording

Rapport: 3154

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: Strategische omgevingsadviseur

naam: Dorothée van Tol-Leenders

datum: 14 februari 2022

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Mirjam Hack-ten Broeke

datum: 14 maart 2022





---

# 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 door dit hiaat 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 inclusieve society*, als onderdeel van de wettelijke onderzoekstaken Natuur en Milieu (WOT N&M).



---

# 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 dit onderzoek is bepaald hoe groot de verandering van bodemtemperatuur de afgelopen veertig jaar is geweest en welke gevolgen dit kan hebben voor de vegetatie, het bodemleven en diverse bodemprocessen zoals veenoxidatie en denitrificatie. Het onderzoek betrof data-analyse en tijdreeksmodellering en enkele verkennende studies met simulatiemodellen. De belangrijkste conclusies 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. Hier treedt een vorm van een natuurlijk hitte-eiland op. In bosgebieden wordt, door de beperkte instraling, verwacht dat de bodemtemperatuur juist minder sterk zal stijgen. Dit pleit ervoor om op meerdere plaatsen bodemtemperatuur te gaan meten. Dit is een relatief goedkope meetmethode en geeft – doordat bodem de luchttemperatuur uitdempt en vertraagt – een beter beeld van langjarige trends dan de luchttemperatuur gemeten op 1,5 m.

## **Bodemprocessen versnellen als gevolg van verhoging bodemtemperaturen**

De bodemtemperatuur is een van de factoren die meespeelt in bodemprocessen, zoals mineralisatie, veenoxidatie en denitrificatie. In zijn algemeenheid constateren we op basis van literatuuronderzoek dat een stijging van de bodemtemperatuur tot een versnelling van bodemprocessen leidt, maar dat de mate waarin niet eenduidig is. In de meeste gevallen wordt in simulatiemodellen een  $Q_{10}$ -, Arrhenius- of exponentiële relatie verondersteld, waarbij de processnelheid toeneemt met toenemende temperatuur. Vaak wordt een  $Q_{10}$  van 2 tot 3 gebruikt. De reden dat geen eenduidige relaties worden gebruikt, ligt mogelijk in het feit dat de genoemde processen afhankelijk zijn van diverse factoren (o.a. vochtgehalte, pH, beschikbaarheid energiebron), waarvan temperatuur er slechts één is. Het is dan ook niet altijd eenvoudig om alleen het temperatuureffect te isoleren en te kwantificeren. De temperatuurafhankelijke relaties die voor de diverse processen gebruikt worden, lopen boven de 20°C sterk uiteen.

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. Onder droge omstandigheden neemt de snelheid van de bodemprocessen af. Als gelijktijdig de bodemtemperatuur toeneemt, nemen deze bodemprocessen toe. Wat het netto-effect zal zijn, hangt af van de specifieke af- en toename op basis van vocht en temperatuur. Dit betekent dat beide factoren van belang zijn bij het doen van voorspellingen naar veranderingen van bodemprocessen.

## **De effecten van bodemtemperatuurstijging voor natuurontwikkeling en dierecologie 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. Hoewel het macroklimaat (landelijk niveau) in het algemeen warmer wordt, kunnen er op de schaal waarin planten reageren andere trends plaatsvinden. Waterbeschikbaarheid is de doorslaggevende driver, ook voor biodiversiteit. Wel is deze factor moeilijk los te zien van temperatuureffecten. De beschikbaarheid van vocht

---

is bovenal limiterend voor de plantengroei. Verdamping wordt bevorderd door een hogere bodemtemperatuur, maar kan worden geremd door de bovengrondse vegetatie. In zijn algemeenheid constateren we op basis van literatuuronderzoek dat kiemings- en vestigingsbiologie in beperkte mate wordt beïnvloed door bodemtemperatuurstijging, overleving en ontwikkeling worden sterker beïnvloed. Hierdoor is het mogelijk dat er een verschuiving van vegetatietypes gaat plaatsvinden. Dit geldt met name voor meerjarige vegetatie die minder kans heeft dan zich sterk ontwikkelende vroeg kiemende eenjarigen. Daarnaast kan het aantal plantensoorten worden beïnvloed door veranderingen in de bodemtemperatuur. Zeker in vegetaties die duidelijk seizoensgebonden karakteristieken hebben, bijvoorbeeld in de kweldergemeenschappen, zijn deze effecten goed te meten.

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 (gebiedsniveau). De lokale variatie in temperatuur en vocht is belangrijker dan het macroklimaat. Door nu al gericht te kijken naar zeer lokale omstandigheden kan een beeld worden verkregen wat de invloed is van een generiekere verhoging van de bodemtemperatuur in de toekomst.

Hogere bodemtemperaturen kunnen de stofwisseling van de organismen versnellen en daarmee de bodemademhaling en C-emissies verhogen. Aanpassingen van micro-organismen aan opwarming kunnen klimaateffecten dempen. Verder kunnen er interacties ontstaan tussen temperatuur en droogte en tussen de planten en het bodemleven. Veranderingen in temperatuur zijn zelden de enige factor die verandert. Hogere temperaturen versterken droogte in de zomer door verhoging van de verdamping door de vegetatie. Droogte kan de fysiologie en structuur van de microbiële gemeenschap veranderen, waardoor de omzettingen van organische stof en bodemfuncties worden beïnvloed. Veranderingen in bepaalde groepen bodemdieren, zoals regenwormen, werken waarschijnlijk via cascade-effecten door naar andere groepen organismen in de bodem en naar het functioneren van ecosystemen.

### **Meer onderzoek moet duidelijk maken wat de invloed is van verdere bodemtemperatuurstijging op de natuurontwikkeling onder specifieke condities**

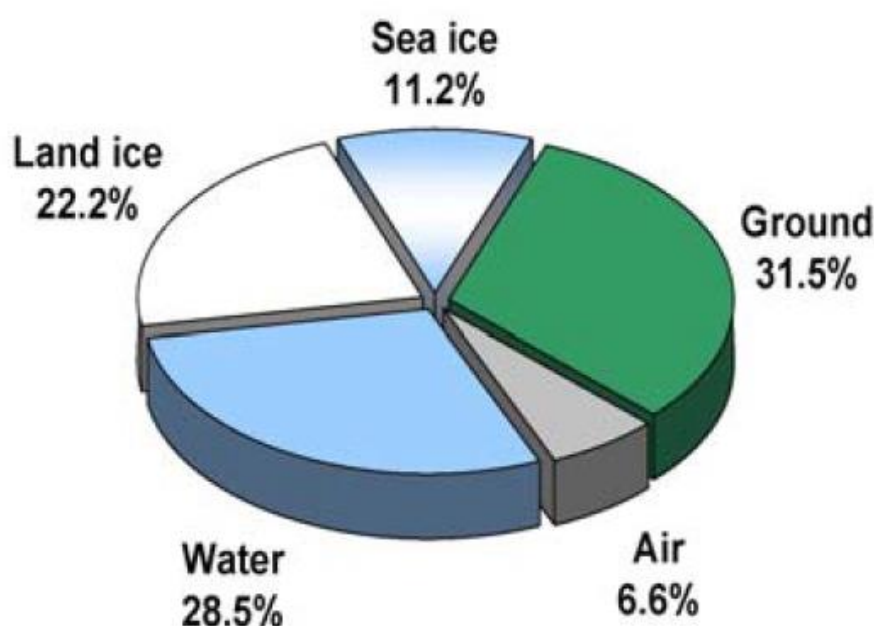
Dit onderzoek was een eerste aanzet om de kennis over de ontwikkeling van de bodemtemperatuur en de gevolgen die dit heeft op de biotische en abiotische processen in de bodem te vergroten. De belangrijkste vervolgvragen liggen bij het voorspellen van de bodemtemperatuur in de toekomst, de effecten van seizoensgebonden veranderingen (verschuivingen) 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 enkele KNMI-sites met grasland. 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 het voorkomen van meer extreme, kortdurende stijgingen of het 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 vegetaties (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.
- Op basis van tijdreeksanalyse en toekomstscenario's (KNMI '14 klimaatscenario's) kan een beeld van de verandering van de bodemtemperatuur van de meetlocaties worden geschetst met behulp van het in dit onderzoek ontwikkelde tijdreeksmodel. Aanvullend kan met het agrohydrologische model SWAP de bodemtemperatuur berekend worden voor andere vegetaties en omstandigheden, zoals drogere/minder vegetatie of juist meer beschut (bossen). Op basis van het tijdreeksmodel en de SWAP-berekeningen kan ook gekeken worden of er een continentale of zonale gradiënt te vinden is in de meetdata.
- Om de gevolgen van de opwarming van de bodem zoals geschetst in het literatuuronderzoek en voorspeld voor enkele (KNMI-)locaties verder te concretiseren, zal een aantal specifieke cases moeten worden onderzocht. Cases waarbij opwarming een positief effect op de natuurwaarde kan hebben (duingraslanden), cases waar opwarming juist een negatief effect kan hebben (ofwel de graslanden op veen of heide of schrale graslanden) en cases waar opwarming eigenlijk geen rol speelt, hoewel modellen dit wel aangeven (eiken-(haag)beukenbossen). Dit kan helpen om de juiste klimaatadaptieve inrichtings- en beheersmaatregelen te nemen.

# 1 Inleiding

De klimaatscenario's (KNMI '14 scenario's) geven aan dat de komende jaren de luchttemperatuur verder gaat stijgen. De extra warmte wordt opgeslagen in de ondergrond, het zeewater en het smelten van ijs. Ongeveer 30% van de warmte wordt opgeslagen in de ondergrond (Nordell, 2008) (Figuur 1). Die extra opgeslagen warmte in de ondergrond heeft geleid tot een temperatuurstoename. De bodem is daarmee een belangrijke buffer tegen een versnelde opwarming.

Deze toename van de bodemtemperatuur is in Nederland te meten tot op grote diepte (>50 m -mv) (Kooi, 2008) en zal de komende dertig jaar verder stijgen (IF Technology, 2012). In de zomer is die stijging ondiep (<2 m -mv) en nog hoger (Kooi, 2008) en zal sterk afhankelijk zijn van het type bodem, de bedekking van die bodem en het beheer of gebruik.



**Figuur 1** Warmte-accumulatie in de lucht, grond, water en ijs als gevolg van de opwarming van de aarde (Nordell, 2008).

Bodemtemperatuur is belangrijk voor het kiemen en groeien van planten en heeft invloed op natuurontwikkeling, bodemleven (plantenwortels, schimmels, microben micro en macro invertebrata (nematoden, mijten, wormen, insecten), 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).

Er is weinig bekend over de langjarige temperatuurverandering (en dynamiek (dag/nacht, zomer/winter) in de ondiepe ondergrond (tot 2 m -mv). In Nederland wordt slecht op enkele plaatsen de ondiepe temperatuur gemeten (KNMI, WUR). Ook wordt in de diverse klimaatscenario's beperkt aandacht besteed aan de veranderende bodemtemperatuur en de gevolgen die dit heeft op de lucht- en waterhuishouding in de bodem. Ten slotte ontbreekt het aan een kwantificering van de gevolgen van de veranderende bodemtemperatuur op met name het bodemleven. De onbekendheid maakt dat het niet mogelijk is te anticiperen op toekomstige verandering van de bodemtemperatuur.



---

Het doel van dit onderzoek is het begrijpen van het proces van veranderende bodemtemperatuur en de gevolgen die dit kan hebben op de (natuur)gebieden in Nederland. Het onderzoek kent de volgende scope:

- 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).

Om te weten hoe de bodemtemperatuur zich de afgelopen veertig jaar heeft ontwikkeld, is een analyse gedaan van de bodemtemperatuurmetingen die uitgevoerd zijn op een viertal KNMI-meetlocaties (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 wordt gekeken of het met het ontwikkelde tijdreeksmodel mogelijk is om voor diverse klimaatscenario's voorspellingen te doen over bodemtemperatuur in de komende decennia.

De veranderingen van diverse chemische en biologische deelprocessen in de bodem die worden beïnvloed door de bodemtemperatuur zijn beschreven op basis van literatuuronderzoek (hoofdstuk 3). Ook is gekeken welke modellen er zijn om de genoemde processen te beschrijven en hoe daarin wordt gecorrigeerd voor verandering van de bodemtemperatuur. Verder wordt gekeken hoe wordt omgegaan met de (mogelijke) interacties tussen bodemvocht en bodemtemperatuur in (agro)hydrologie. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de invloed van bodemvocht op de dynamiek van de bodemtemperatuur en omgekeerd: de invloed van bodemtemperatuur op de dynamiek van bodemvocht.

Wat de invloed van de temperatuur van de bodem is op de diverse biotische processen in de bodem, is beschreven in hoofdstuk 4. De bodemtemperatuur kan directe en indirecte effecten hebben op de vegetatie en bodemleven. Omgekeerd kan ook de vegetatie en bodemleven direct en indirect effect hebben op de bodemtemperatuur. Door dit enorme complex aan factoren is het ontleden van het effect van bodemtemperatuur op de natuurlijke ontwikkeling van vegetatie en bodemleven een zeer ingewikkelde opgave. Op basis van een theoretische studie is getracht een overzicht te geven van de rol van bodemtemperatuur op de natuurlijk plantengroei en hoe dit de vegetatie kan beïnvloeden.

In dit onderzoek worden Nederlandse gegevens aangevuld met experimenten en velddata uit het buitenland. Op basis hiervan zijn hypothesen opgesteld voor de ontwikkeling van de bodemtemperatuur in natuur- en agrarische gebieden. Dit maakt dat we op basis van het literatuuronderzoek en trendanalyse slechts voor een aantal onderwerpen harde conclusies hebben kunnen trekken. Voor een deel van het onderzoek was dit onmogelijk en is op basis van ons oordeel als experts bepaald hoe processen zich mogelijk ontwikkelen in tijd en ruimte (hoofdstuk 5). Dit heeft ook geleid tot een aantal onderzoeksvragen die in een volgend onderzoek kunnen worden beantwoord.

Het onderwerp opwarming van de bodem wordt in deze studie vanuit diverse invalshoeken bekeken. Hierdoor hebben we aandacht voor geostatistiek en tijdreeksanalyse, agrohydrologie, dierecologie en natuurontwikkeling. Vanwege de leesbaarheid is ervoor gekozen om de hoofdlijnen van het onderzoek in de hoofdtekst te plaatsen en voor meer details te verwijzen naar de bijlagen. Dit onderzoek is een eerste inventarisatie; in 2022 zal het onderzoek een vervolg krijgen, waarbij meer aandacht is voor de toekomstige ontwikkeling van de bodemtemperatuur en welke invloed dit heeft op natuurgebieden met hun specifieke micro-klimatologische condities.

---

## 2 Tijdreeksanalyse bodem- en luchttemperatuur

### 2.1 Inleiding

Het KNMI meet op vier locaties viermaal per dag de bodemtemperatuur (Figuur 2): 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.

Dit hoofdstuk heeft tot doel de volgende onderzoeksvragen te beantwoorden:

1. Is er een stijgende trend in bodemtemperatuur?
2. Stijgt bodemtemperatuur sneller dan luchttemperatuur?
3. Hoe hangt de bodemtemperatuur samen met luchttemperatuur op verschillende dieptes?
4. Hoe hangt de bodemtemperatuur samen met neerslagsom en met globale straling? (Zie Bijlage 1.)
5. Verklaart SWAP de dynamiek van bodemtemperatuur volledig en hoe verhoudt zich dit tot een TFN-model? (Zie Bijlage 2.)

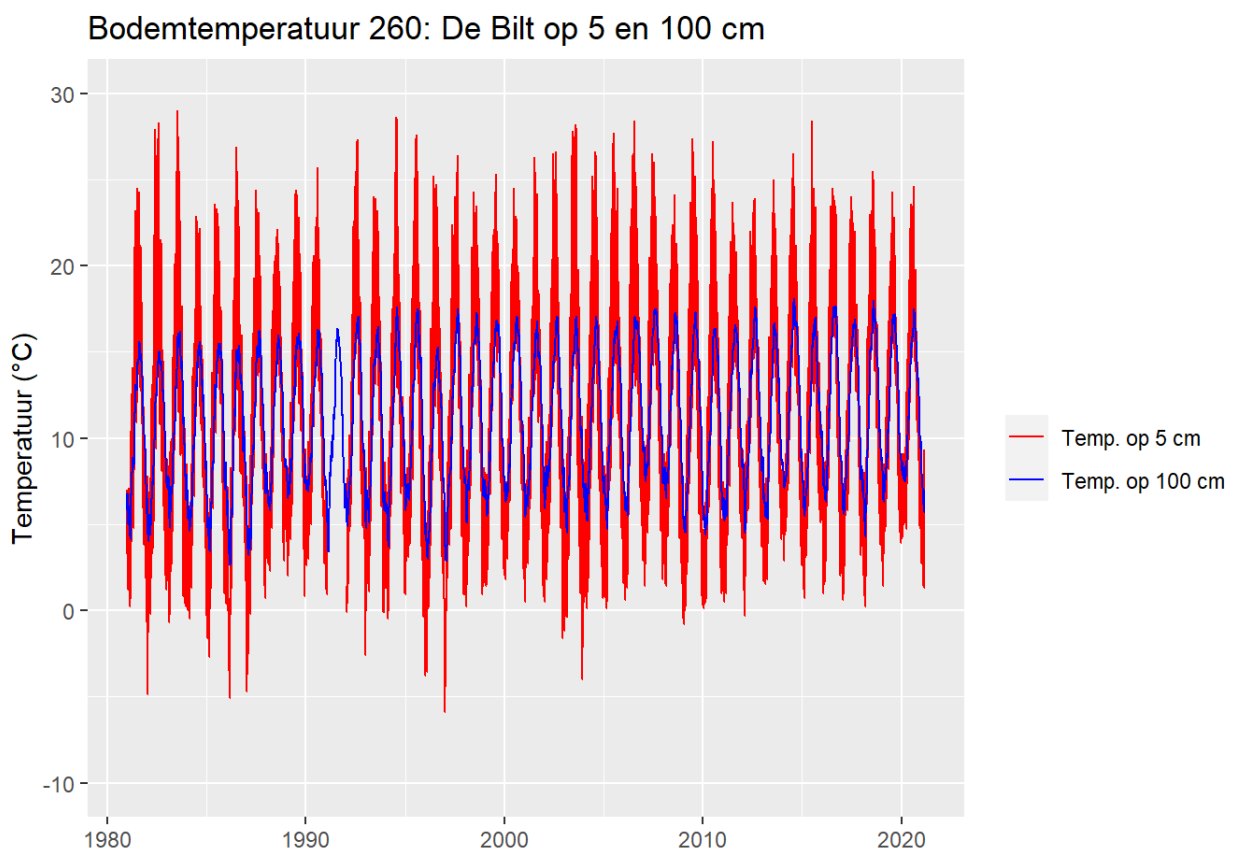


**Figuur 2** KNMI-meetlocatie met bodemtemperatuur.

## 2.2 Exploratieve data-analyse

Een visuele beoordeling van tijdreeksgrafieken is de eerste stap in de analyse van de bodemtemperatuurreeksen. De tijdreeksen van bodemtemperaturen zijn ontleend aan de website van het KNMI: <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/bodemtemperaturen>. De bodemtemperatuur wordt gemeten op 5, 10, 20, 50 en 100 m diepte. Totaal zijn er dus twintig reeksen van bodemtemperaturen. Dit hoofdstuk beperkt zich tot een exploratieve, visuele analyse van de reeksen van De Bilt (station 260). De analyses voor de overige drie stations zijn ook uitgevoerd, maar niet opgenomen in de rapportage.

De analyses worden uitgevoerd met het statistische softwarepakket R. De analyse begint met het bekijken van de 'ruwe' tijdreeksgrafieken met behulp van het R-package ggplot. Met een 'smoother' (moving window) kunnen langjarige trends zichtbaar worden gemaakt. Hiervoor gebruiken we het algoritme dat ggplot voor de betreffende reeks automatisch selecteert. We beginnen met de ondiepste (5 cm) en diepste (100 cm). Figuur 3 geeft een tijdreeksgrafiek van de bodemtemperatuur op 5 en 100 cm diepte en laat zien dat bodemtemperatuur een jaarlijkse seizoensfluctuatie vertoont, zowel op 5 als op 100 cm diepte. De tijdreeksgrafiek laat verder zien dat de temperatuur op 100 cm diepte minder fluctueert dan op 5 cm diepte.



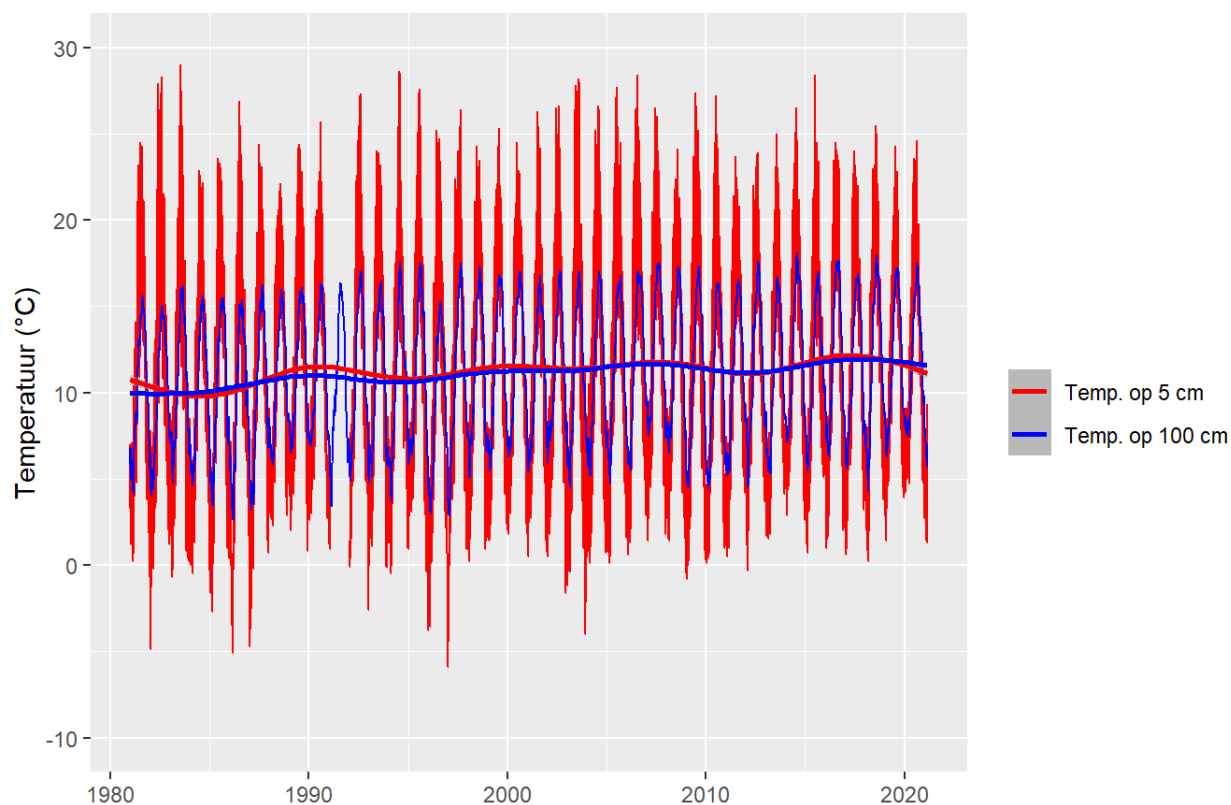
**Figuur 3** Tijdreeksgrafiek van zes-uurlijkse bodemtemperaturen bij KNMI-station 260, De Bilt.

Om langjarige trends zichtbaar te maken zijn de tijdreeksen van Figuur 3 gefilterd met een *smoother*. Hiervoor is de smoother gebruikt die het R-package ggplot automatisch voor de betreffende reeks selecteert, in dit geval een general additive model smoother (gam) gebruikt, met als formule

$$y \sim s(x, bs = 'cs')$$

waarin 'cs' aangeeft dat *cubic regression splines* zijn gebruikt. Figuur 4 laat zien dat de bodemtemperaturen bij KNMI-station 260 De Bilt sinds 1981 gemiddeld genomen stijgen. Deze stijging verloopt niet lineair, maar met een golfbeweging.

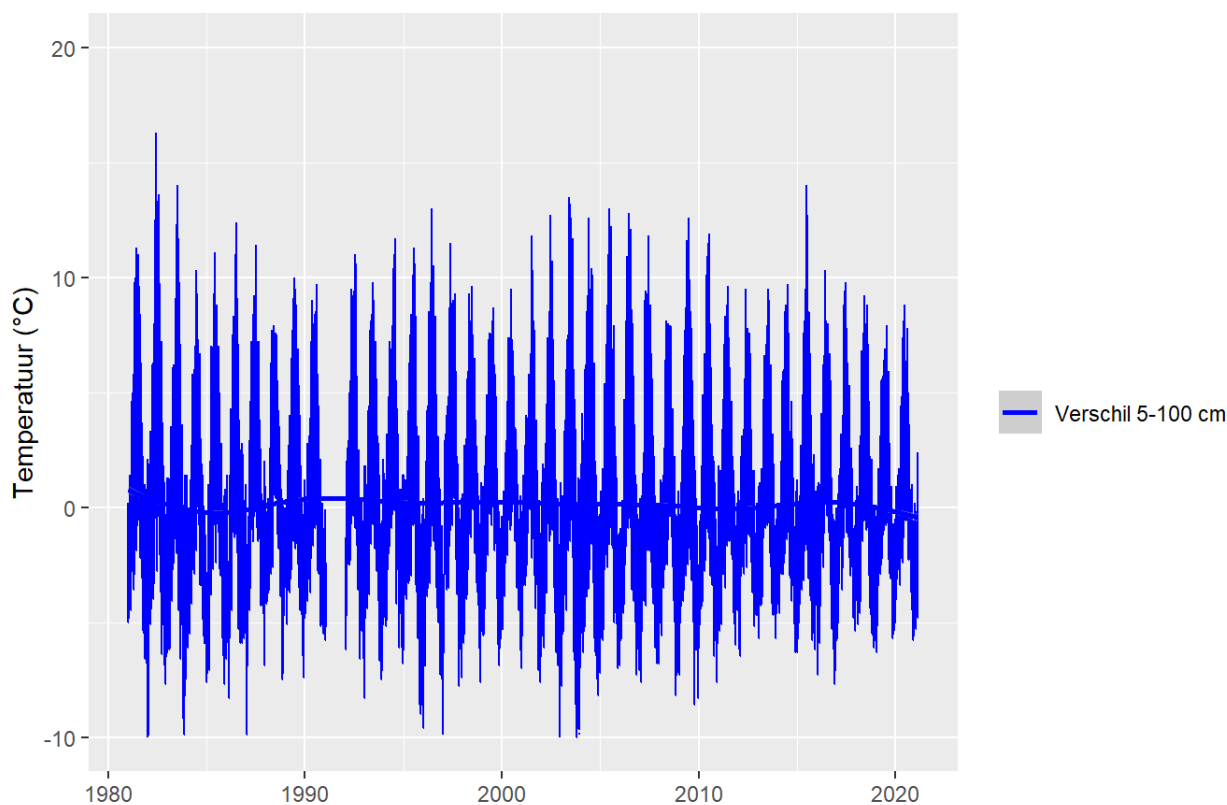
## Bodemtemperatuur 260: De Bilt op 5 en 100 cm



**Figuur 4** Tijdsreeksgrafiek van zes-uurlijkse bodemtemperaturen bij KNMI-station 260 De Bilt, gefilterd met een gam-smoother.

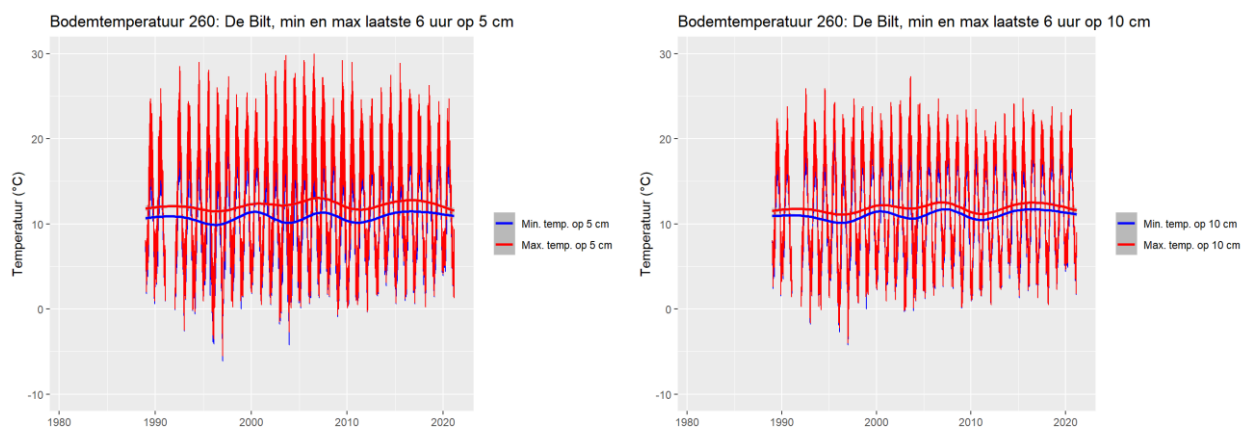
Om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen bodemtemperaturen op verschillende dieptes en eventuele veranderingen in die relatie, geeft Figuur 5 een tijdsreeksgrafiek van de verschillen in luchttemperatuur op 5 en 100 cm diepte. Hieruit blijkt dat deze verschillen sinds 1981 eerder af- dan toenemen. In elk geval is er geen duidelijke langjarige trend te zien. In de winter is de bodemtemperatuur op 5 cm diepte lager dan op 100 cm, in de zomer is dit andersom.

## Bodemtemperatuur 260: De Bilt op 5 en 100 cm



**Figuur 5** Verschillen in zes-uurlijkse bodemtemperaturen, 5 cm -100 cm, bij KNMI-station 260 De Bilt. Ook de gesmoothde reeks is weergegeven (gam).

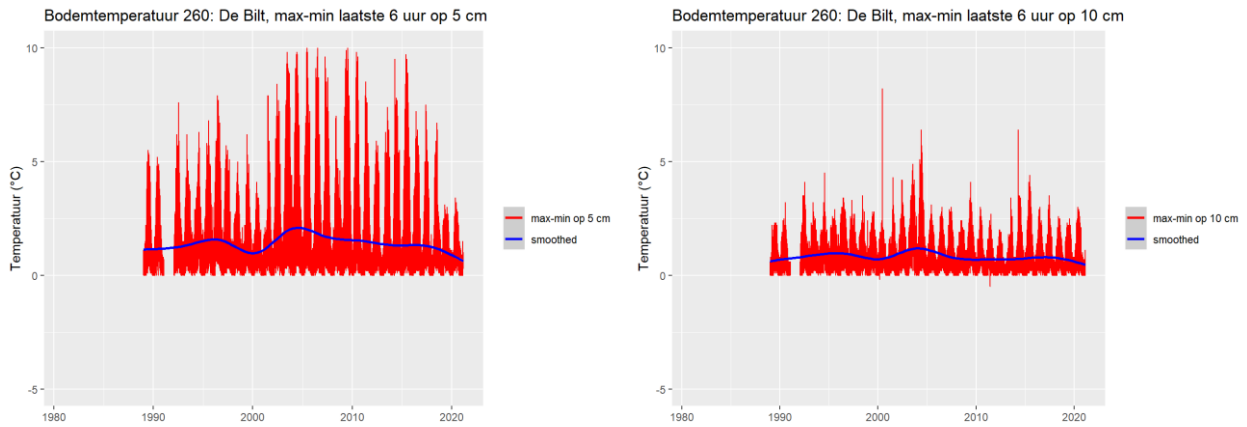
Het KNMI geeft niet alleen zes-uurlijkse waarnemingen van de bodemtemperatuur, maar geeft ook de minimale en maximale bodemtemperatuur die in de afgelopen zes uur zijn gemeten op 5 en 10 cm diepte. Deze waarnemingen geven inzicht in de fluctuaties van de bodemtemperatuur binnen een tijdsperiode van zes uur, zie Figuur 6.



**Figuur 6** Minimale en maximale bodemtemperaturen in periodes van zes uur op 5 cm (links) en 10 cm diepte, bij KNMI-station 260 De Bilt. Ook de gesmoothde reeksen zijn weergegeven (gam).

Figuur 7 laat de verschillen zien tussen de maximale en minimale temperatuur in een periode van zes uur. Uit deze tijdreeksgrafieken blijkt dat deze verschillen veranderen in de tijd en een aantal jaren achtereen relatief klein (begin jaren 2000, 5 cm diepte) of groot kunnen zijn. De laatste jaren (2019, 2020) zijn de verschillen relatief klein.





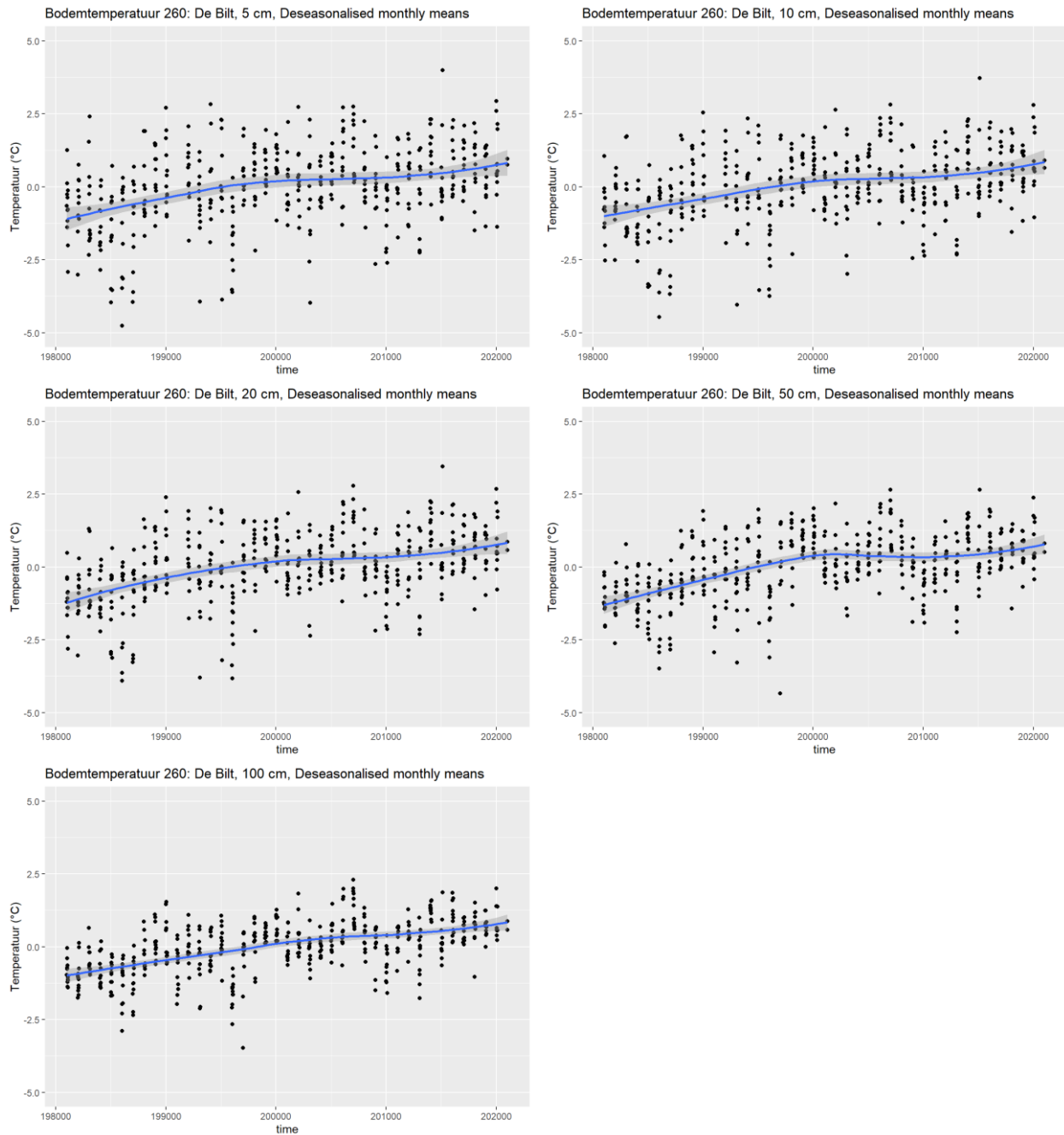
**Figuur 7** Verschil tussen maximale en minimale bodemtemperatuur gedurende zes-uurlijkse perioden, op 5 cm (links) en 10 cm diepte, bij KNMI-station 260 De Bilt. De blauwe lijn is de gesmoothde reeks (gam).

Om meer inzicht te krijgen in langjarige trends, zijn uit de zes-uurlijkse data maandgemiddelden berekend. Deze maandgemiddelden zijn daarna als volgt 'gedesezoenaliseerd':

$$y_{y,m}^* = y_{y,m} - \bar{y}_m \quad (1)$$

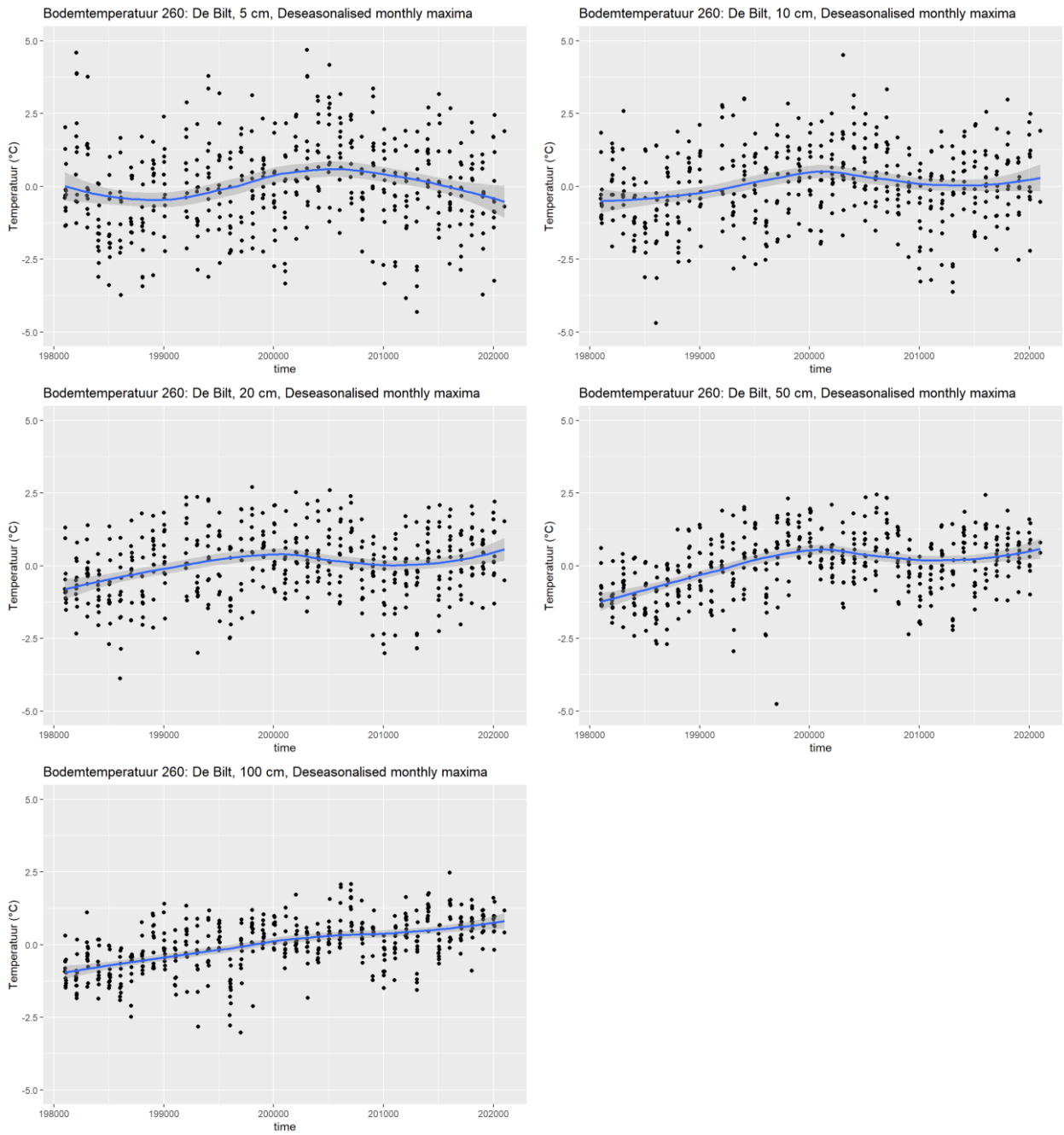
waarin het subscript  $y$  het jaar aangeeft, subscript  $m$  de maand en  $\bar{y}_m$  het gemiddelde van de maanden  $m$  is.

Figuur 8 geeft tijdreeksgrafieken van de gedesezoenaliseerde maandgemiddelde bodemtemperaturen. De lijn met band geeft de gesmoothde reeks aan met een 95%-betrouwbaarheidsinterval, waarbij gebruik is gemaakt van *local polynomial regression fitting* (loess) als smoother. Uit deze grafieken blijkt dat de bodemtemperatuur bij 260 De Bilt tussen 1981 en 2020 op alle vijf diepten gemiddeld met circa 1,5°C is gestegen.

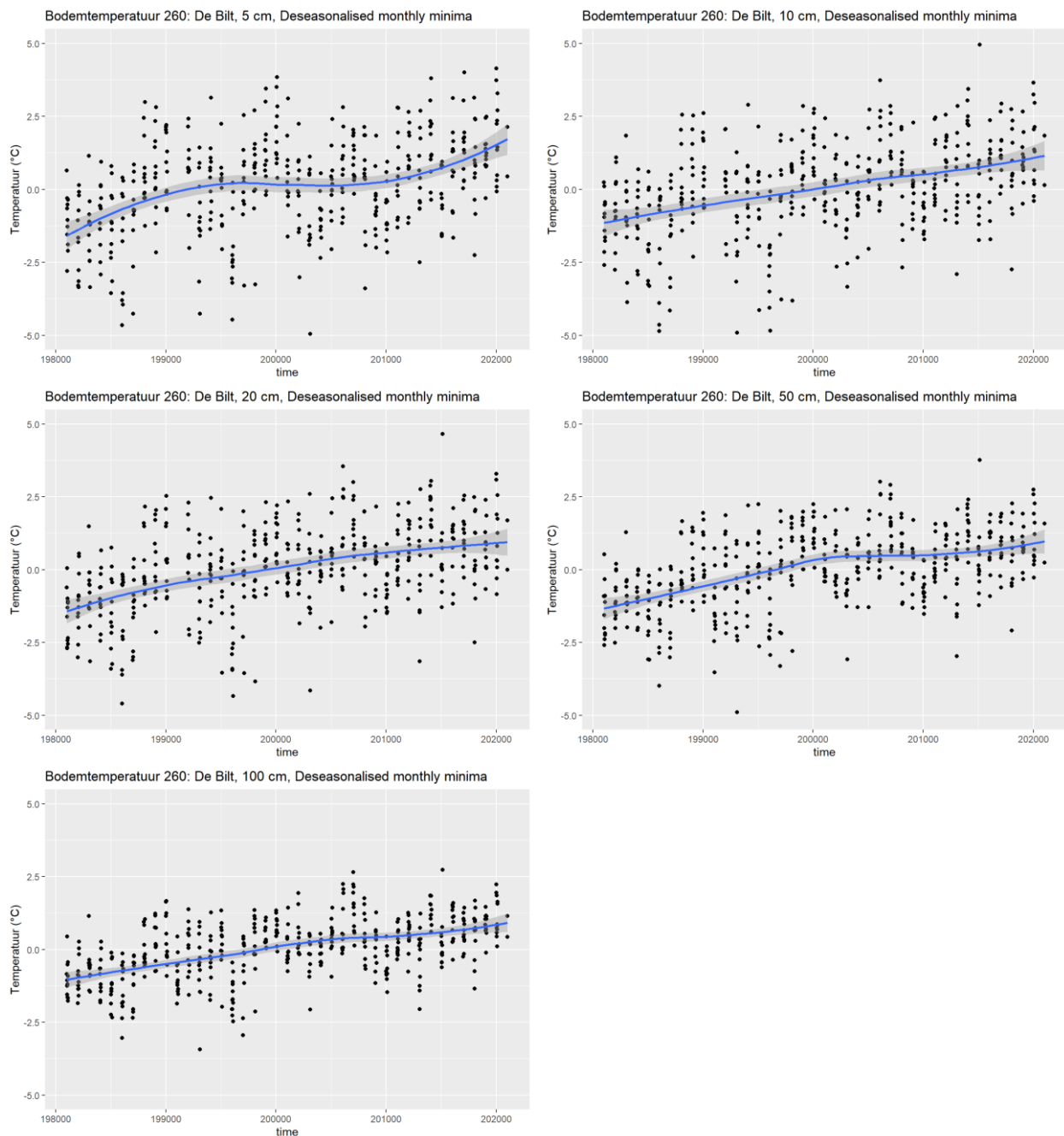


**Figuur 8** Gedesezoenaliseerde reeksen van maandgemiddelde bodemtemperaturen op 5, 10, 20, 50 en 100 cm diepte bij KNMI-station 260 De Bilt. De lijn geeft de gesmoothde reeks aan (loess, local polynomial regression fitting, met 95%-betrouwbaarheidsinterval).

De analyse is herhaald voor de gedesezoenaliseerde maandelijkse maximale (Figuur 9) en minimale (Figuur 10) bodemtemperatuur, om inzicht te krijgen in veranderingen in extremen. Opmerkelijk is dat de maxima op 5 en 10 cm niet het stijgende patroon hebben dat bij maxima op grotere diepten en bij gemiddelde en minimale maandtemperaturen wel is te zien.

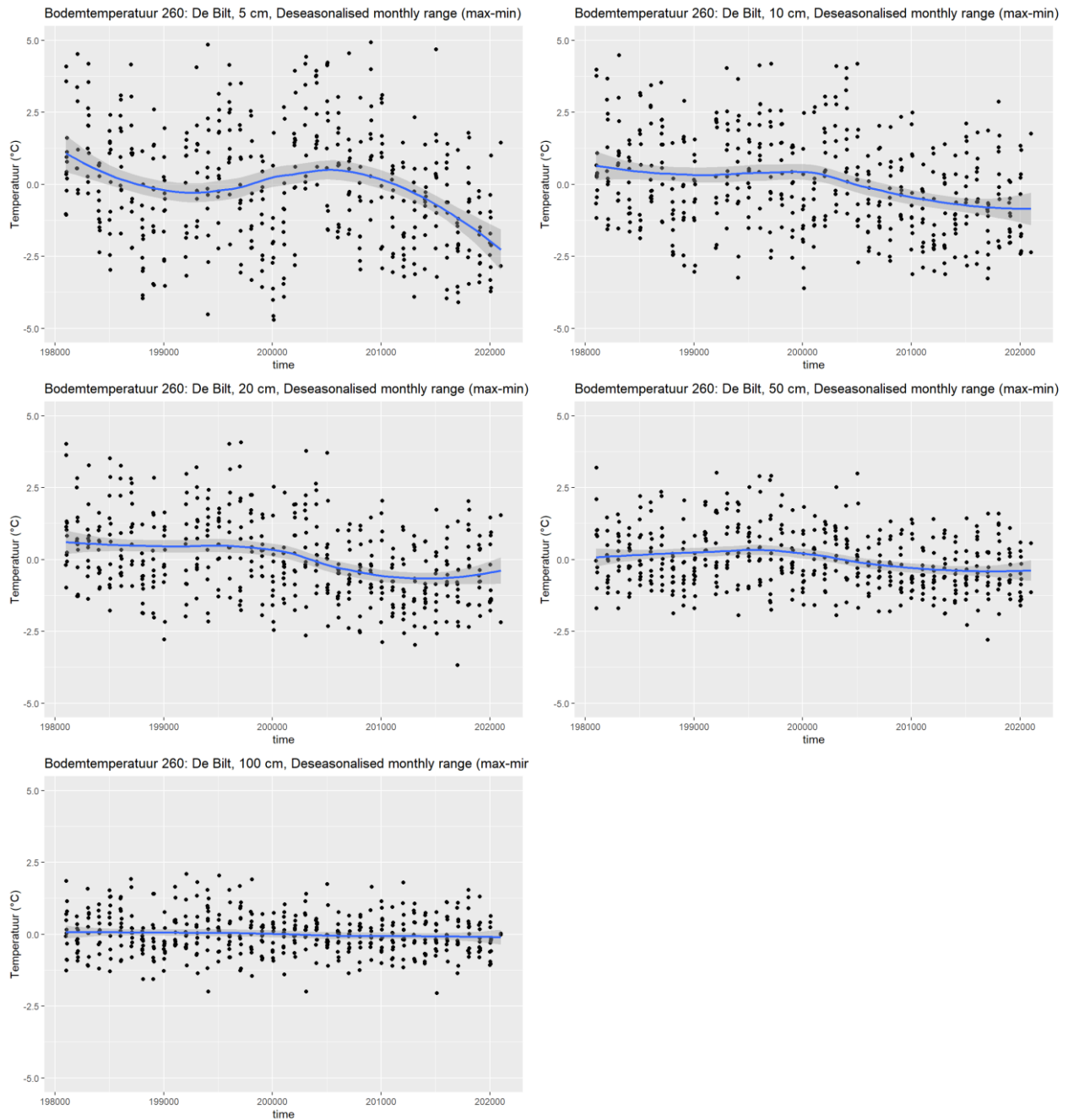


**Figuur 9** Gedesezoenaliseerde maandelijkse maxima van bodemtemperaturen op 5, 10, 20, 50 en 100 cm bij KNMI-station 260 De Bilt. De lijn geeft de gesmoothde reeks aan (loess, local polynomial regression fitting, met 95%-betrouwbaarheidsinterval).



**Figuur 10** Gedesezoenaliseerde maandelijkse minima van bodemtemperaturen op 5, 10, 20, 50 en 100 cm diepte bij KNMI-station 260 De Bilt. De lijn geeft de gesmoothde reeks aan (loess, local polynomial regression fitting, met 95%-betrouwbaarheidsinterval).

Ten slotte beoordelen we of er een trend is waar te nemen in de gedesezoenaliseerde verschillen tussen maximale en minimale maandtemperaturen van de bodemtemperaturen bij KNMI-station 260 De Bilt, aan de hand van de tijdreeksgrafieken in Figuur 11. Deze tijdreeksgrafieken laten zien dat het verschil tussen maximale en minimale maandtemperatuur op 5 cm diepte in de loop van de periode 1981-2021 met circa 3,5°C is afgenomen. Naarmate de diepte toeneemt, is deze afname minder groot en op 100 cm diepte lijkt niet of nauwelijks van een afname sprake te zijn.



**Figuur 11** Gedesezoenaliseerde verschillen tussen maximale en minimale maandtemperatuur van de bodem op 5, 10, 20, 50 en 100 cm diepte bij KNMI-station 260 De Bilt. De lijn geeft de gesmoothde reeks aan (loess, local polynomial regression fitting, met 95%-betrouwbaarheidsinterval).

## 2.3 Trendanalyse

De trendanalyse is erop gericht antwoord te vinden op de volgende onderzoeksvragen:

- Is er een stijgende trend in lucht- en bodemtemperatuur?
- Stijgt de temperatuur in de bodem sneller dan in de lucht?

Opgemerkt moet worden dat alleen de reeks luchttemperaturen van KNMI-station 260 De Bilt is gehomogeniseerd en daardoor geschikt is voor trendanalyse. De reeksen van de andere stations kunnen effecten als gevolg van veranderingen in de meetopstelling bevatten, wat het beeld kan vertekenen.



Trendanalyse werd uitgevoerd op gedesezoenaliseerde reeksen van maandgemiddelde lucht- en bodemtemperaturen, zie vergelijking (1). 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

$$n_t - c = \phi_1(n_{t-1} - c) + \epsilon_t + \theta_1\epsilon_{t-1}$$

i.e. een ARMA(1,1)-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  $\epsilon_t$  een i.i.d. reeks te vormen (*independently, identically distributed*). Dit verifiëren we aan de hand van een tijdreeksgrafiek en het residuele autocorrellogram.

Tabel 1 geeft de geschatte waarden van de trendparameter  $\hat{\beta}_1$ . Vetgedrukt zijn de waarden die significant van 0 verschillen, bij een significantieniveau van 0.05. In alle gevallen is sprake van een positieve, stijgende trend. Voor station 323 Wilhelminadorp kon op basis van de data geen trend in de bodemtemperaturen worden aangetoond. Van de vier stations stijgt de luchttemperatuur in 323 Wilhelminadorp het minst snel. Voor bodemtemperaturen op 50 cm bij station 286 Nieuw Beerta is oktober 1991 als begindatum gekozen, omdat eerdere waarnemingen voor deze diepte ontbraken.

**Tabel 1** Trendparameters (°C per jaar) (standaardfouten tussen haakjes).

Station	begin	eind	trend in °C per jaar (standaardfout)					
			lucht	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm
260 De Bilt	1981-01	2021-02	<b>0.0405</b> (0.0089)	<b>0.0402</b> (0.0085)	<b>0.0402</b> (0.0076)	<b>0.0420</b> (0.0076)	<b>0.0438</b> (0.0077)	<b>0.0424</b> (0.0066)
323 Wilhelminadorp	1989-11	2021-02	<b>0.0297</b> (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	<b>0.0395</b> (0.0131)	<b>0.0256</b> (0.0121)	<b>0.0296</b> (0.0121)	<b>0.0340</b> (0.0116)	<b>0.0392</b> (0.0107)	<b>0.0375</b> (0.0097)
286 Nieuw Beerta	1990-01	2021-02	<b>0.0456</b> (0.0135)	<b>0.0400</b> (0.0120)	<b>0.0340</b> (0.0116)	<b>0.0494</b> (0.0110)		<b>0.0291</b> (0.0081)
	1991-10	2021-02	<b>0.0460</b> (0.0148)				<b>0.0396</b> (0.0110)	

Uit de resultaten in Tabel 1 kan het volgende worden geconcludeerd:

1. In de gemiddelde maandtemperaturen van lucht is een stijgende lineaire trend aangetoond (bij een significantieniveau van 0.05) van circa 0.030 tot 0.045°C per jaar gedurende de laatste 30 à 40 jaar.
2. In de bodemtemperaturen van 260 De Bilt, 273 Marknesse en 286 Nieuw Beerta zijn stijgende lineaire trends aangetoond op diepten van 5, 10, 20, 50 en 100 cm.
3. In de bodemtemperaturen van 323 Wilhelminadorp kon op basis van de data geen trend worden aangetoond.

Om de onderzoeksvraag te beantwoorden of de bodemtemperatuur sneller stijgt dan de luchttemperatuur, maken we een reeks verschilwaarden:

$$y_{d,t} = y_{s,t} - y_{a,t}$$

met  $y_{s,t}$  en  $y_{a,t}$  reeksen bodemtemperatuur en luchttemperatuur op tijdstip  $t$ ,  $t = 1 \dots n$ . De verschilreeks wordt gedesezoenaliseerd (vergelijking (1)) en gecorrigeerd voor het gemiddelde tot een reeks  $y'_{d,t}$ .

De reeks  $y'_{d,t}$  wordt gemodelleerd met het volgende model:

$$y'_{d,t} = l_t + n_t$$

met

$$l_t = \beta_1 r_t$$

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

$$n_t - c = \phi_1(n_{t-1} - c) + \epsilon_t + \theta_1\epsilon_{t-1}$$

i.e. een ARMA(1,1)-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  $\epsilon_t$  een i.i.d. reeks te vormen (*independently, identically distributed*). Dit verifiëren we aan de hand van een tijdreeksgrafiek en het residuele autocorrellogram.

We toetsen nu de volgende hypothese:

$$H_0: \beta_1 \leq 0, \text{ tegen } H_a: \beta_1 > 0.$$

De toetsingsgrootte is:

$$t = \frac{\hat{\beta}_1}{s.e.(\hat{\beta}_1)}$$

Onder de nulhypothese is de verdeling van de toetsingsgrootte  $t(v)$  met  $v = n - k$  en  $k = 4$  het aantal parameters van het tijdreeksmodel.

De resultaten van de toets (rechtszijdige  $p$ -waarden) staan in Tabel 2.

**Tabel 2** *P-waarden voor een rechtszijdige t-toets op de trendparameter voor de verschillen tussen maandgemiddelde bodem- en luchttemperatuur.*

Station	Diepte (cm)				
	5	10	20	50	100
260 De Bilt	0.4273	0.4290	0.2868	0.2427	0.3530
323 Wilhelminadorp	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
273 Marknesse	0.9993	0.9889	0.8955	0.4788	0.5843
286 Nieuw Beerta	0.8180	0.9833	0.2303	0.8933	0.9899

Op grond van de data kan niet worden aangetoond dat de bodemtemperatuur een sterkere positieve lineaire trend vertoont dan de luchttemperatuur (bij een significantieniveau van 0.05).

---

## 2.4 Conclusies tijdreeksanalyses

Op basis van de tijdreeksanalyse kunnen de volgende antwoorden op de onderzoeksvragen worden gegeven:

- Zowel uit visuele beoordeling van tijdreeksgrafieken als uit modellering van lineaire trends concluderen we dat er stijgende trends in de bodemtemperatuur op 5, 10, 20, 50 en 100 cm zijn bij KNMI-stations 260 De Bilt (sinds 1980), 273 Marknesse (sinds 1989) en 286 Nieuw Beerta (sinds 1989) bij een 5%-significantieniveau. Voor KNMI-station 323 Wilhelminadorp (sinds 1989) kon alleen een stijgende trend worden aangetoond in de bodemtemperatuur op 5 cm diepte. De stijgende lineaire trends liggen in de grootteorde van 0.026 tot 0.046°C per jaar. Dit resulteert in een stijging van de bodemtemperatuur in de afgelopen veertig jaar tussen de 1,2 en 1,8°C.
- Met een trendanalyse van de verschilwaarden tussen bodem- en luchttemperatuur kon niet worden aangetoond dat de temperatuur in de bodem sneller stijgt dan in de atmosfeer.
- Uit TFN-modellering bleek dat de invloed van luchttemperatuur op bodemtemperatuur afneemt met de diepte, maar wel langer aanwezig blijft.
- Globale straling bleek naast luchttemperatuur geen dynamiek van bodemtemperatuur te kunnen verklaren. Neerslagsom verklaart naast luchttemperatuur een gering deel van de dynamiek van de bodemtemperatuur.
- Uit de autocorrelatiefunctie van de voorspelfouten van SWAP-berekeningen in de zes-uurlijkse en maandgemiddelde bodemtemperatuur op 5 cm diepte bij KNMI-station De Bilt blijkt dat SWAP-berekeningen de dynamiek niet volledig beschrijven: er blijft een seizoenstructuur over in de voorspelfouten. Bij een lineair TFN-model met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer blijft meer seizoenstructuur in de ruis over, die gemodelleerd wordt met het ruismodel. De spreiding van de ruis is bij een TFN-model geringer dan die van de voorspelfouten van SWAP (standaardafwijking 1.67 vs. 2.23°C).

# 3 Bodemprocessen en bodemtemperatuur

## 3.1 Inleiding

De bodemvocht- en warmtehuishouding van de bodem hebben invloed op elkaar. In dit hoofdstuk worden de volgende onderzoeksvragen beantwoord:

1. Wat is de invloed van bodemvocht op het warmtetransport in de bodem en welke bodemparameters zijn hierbij belangrijk?
2. Welke invloed heeft de bodemtemperatuur op de dynamiek van het bodemvocht?
3. Welke bodemparameters zijn temperatuurafhankelijk en hoe zouden die in modelberekeningen moeten worden aangepast?
4. Ten slotte wordt gekeken naar de invloed van temperatuursverandering op diverse bodemprocessen, zoals nitrificatie, mineralisatie en veenoxidatie.

## 3.2 Invloed bodemvocht op dynamiek bodemtemperatuur

Net zoals voor watertransport in de bodem geldt ook voor warmtetransport in de bodem dat deze moet voldoen aan de wet van behoud van materie/energie, en hierbij geldt dat de warmteflux proportioneel is aan de temperatuurgradiënt. Hierbij komen twee belangrijke warmtecoëfficiënten naar voren: de volumetrische warmtecapaciteit ( $C$ ;  $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ )<sup>1</sup> en de warmtegeleiding ( $\lambda$ ;  $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1} = \text{J m}^{-1} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1}$ )<sup>2</sup>. Deze twee parameters zijn afhankelijk van de individuele eigenschappen van de diverse fasen in de bodem, namelijk de vaste fase (eventueel onderverdeeld in sub-fasen), de waterfase en de luchtfase. Vaak wordt hierbij uitgegaan van de uitdrukkingen die De Vries (1963) hiervoor heeft voorgesteld (zie bijv. Kroes et al., 2017; Ten Berge, 1986; Saito et al., 2006). De warmtecapaciteit wordt dan als volgt gegeven:

$$C = f_{\text{sand}}C_{\text{sand}} + f_{\text{clay}}C_{\text{clay}} + f_{\text{OM}}C_{\text{OM}} + \theta C_{\text{water}} + f_{\text{air}}C_{\text{air}} \quad (1)$$

waarin voor de vaste fase onderscheid wordt gemaakt in de bijdrage van zand- ('sand'), klei- ('clay') en organische stof- ('OM') fracties, ieder met zijn eigen specifieke volumetrische warmtecapaciteit, een bijdrage van de luchtfractie ('air') en de bijdrage van de waterfase waarbij het volumetrische watergehalte  $\theta$  wordt gebruikt. Hieruit wordt duidelijk dat het watergehalte en de veranderingen daarin (en daarmee de bijdrage van de luchtfase) dus van invloed zijn op de overall warmtecapaciteit van de bodem. Typische waarden voor de specifieke volumetrische warmtecapaciteit zijn gegeven in **Tabel 3**.

**Tabel 3** Specifieke volumetrische warmtecapaciteit en specifieke thermische warmtegeleiding voor bodemdeeltjes, water en lucht (bron: Kroes et al., 2017 (naar De Vries, 1963)).

Component	Specifieke volumetrische warmtecapaciteit, $C$ ( $\text{J cm}^{-3} \text{K}^{-1}$ )	Specifieke thermische warmtegeleiding, $\lambda$ ( $\text{J cm}^{-1} \text{K}^{-1} \text{d}^{-1}$ )
Zand	2.128	7603
Klei	2.385	2523
Organische stof	2.496	216
Water (20 °C)	4.180	492
Lucht	0.001212	variabel

<sup>1</sup> Er wordt soms ook uitgegaan van de specifieke warmtecapaciteit  $c$  ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ), waarbij  $C = \rho c$  met  $\rho$  de dichtheid van de betreffende component.

<sup>2</sup> De warmtediffusiviteit is de verhouding tussen geleiding en capaciteit:  $D = \lambda/C$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

---

Ook voor de warmtegeleiding geldt een vorm van mengmodel om deze te berekenen uit de bijdragen van de diverse fracties (Ten Berge, 1986; Kroes et al., 2017).<sup>3</sup> Deze uitdrukking is iets ingewikkelder:

$$\lambda = \frac{X_{s-w}f_s\lambda_s + X_{c-w}f_c\lambda_c + X_{OM-w}f_{OM}\lambda_{OM} + X_{w-w}\theta\lambda_w + X_{a-w}f_a\lambda_a}{X_{s-w}f_s + X_{c-w}f_c + X_{OM-w}f_{OM} + X_{w-w}\theta + X_{a-w}f_a} \quad (2)$$

Hierin zijn de componenten/fasen afgekort met s, c, w en a voor 'sand', 'clay', 'water' en 'air'. De variabele  $X_{n-m}$  is een weegfactor die weer afhankelijk is van de individuele warmtegeleidingen van de fasen  $n$  en  $m$ ; deze worden hier niet nader uitgewerkt (zie Ten Berge, 1986; Kroes et al., 2017). Ook hieruit wordt duidelijk dat het watergehalte en de veranderingen daarin (en daarmee met bijdrage van de luchtfase) dus van invloed zijn op de op de overall warmtegeleiding van de bodem.

Berekeningen van de bodemtemperatuur maken gebruik van zowel  $C$  als  $\lambda$ , en het is dus duidelijk dat de temporele en ruimtelijke variaties in watergehalte  $\theta$  direct van invloed zijn op de dynamiek – in tijd en ruimte – van de berekende bodemtemperaturen.

### 3.3 Invloed bodemtemperatuur op dynamiek bodemvocht

De klassieke manier waarop de dynamiek van bodemvocht wordt beschreven en gesimuleerd, gaat uit van de Richards-vergelijking, die in principe geldt voor isotherme omstandigheden en alleen wordt toegepast voor de vloeistoffase. Met andere woorden, er wordt geen rekening gehouden met door temperatuurgradiënten geïnduceerde vloeistof- en waterdampfluxen.

De invloed van bodemtemperatuur wordt ook vaak ter sprake gebracht waar het gaat om verdamping van water aan het bodemoppervlak. Een ander aspect waar bodemtemperatuur een belangrijke rol speelt, is bij de faseovergangen van water en ijs en eventueel de invloed van sneeuw (zie Jansson and Karlberg, 2011; Bai et al., 2020). Dit wordt hier niet nader geanalyseerd.

#### 3.3.1 Effect temperatuurgradiënt

Ten Berge (1986) heeft in zijn proefschrift in detail gekeken naar de mogelijke invloed van (bodem)temperatuur op de waterbeweging in de bodem. Hij heeft destijds mechanistische (waaronder de paper van Philip en De Vries, 1957) en thermodynamische concepten met elkaar vergeleken. Hieruit bleek onder meer dat deze twee aanpakken op onderdelen tegengestelde fenomenen beschrijven. Bij een constant watergehalte en een gegeven temperatuurgradiënt bijvoorbeeld stroomt water in de richting van de koude temperatuur (mechanistische modellen) of in de richting van de warme temperatuur (thermodynamische modellen). Uiteindelijk komt hij tot de conclusie dat in de vloeistoffase transport als gevolg van een temperatuurgradiënt verwaarloosd kan worden (Ten Berge, 1986, p. 60). In zijn optiek betekent dit dan ook dat (destijds) bestaande concepten waarin hier wel rekening mee wordt gehouden dus onjuist zijn. In zijn Stelling 2 meldt hij bijvoorbeeld "*De door Philip en De Vries [1957] gegeven beschrijving van gekoppeld vocht- en warmtetransport geeft een overschatting van de door temperatuurgradiënten geïnduceerde vloeistofflux.*" Toch wordt er in de literatuur vaak verwezen naar de studie van Philip en De Vries (1957); vaak gaat het daarbij om de studie naar verdamping aan maaiveld.

#### 3.3.2 Effect temperatuur op hydraulische eigenschappen

De wet van Darcy geeft aan dat de waterflux gelijk is aan de gradiënt in waterpotentiaal keer een doorlaatfactor. Deze doorlaatfactor wordt bepaald door de interne frictie in de stromende vloeistof (water), zoals gekarakteriseerd door de viscositeit ( $\mu$ ; mPa s) en door de frictie tussen de bodem en de vloeistof (Koorevaar et al., 1983). Dat laatste wordt primair bepaald door de structuur van de bodem

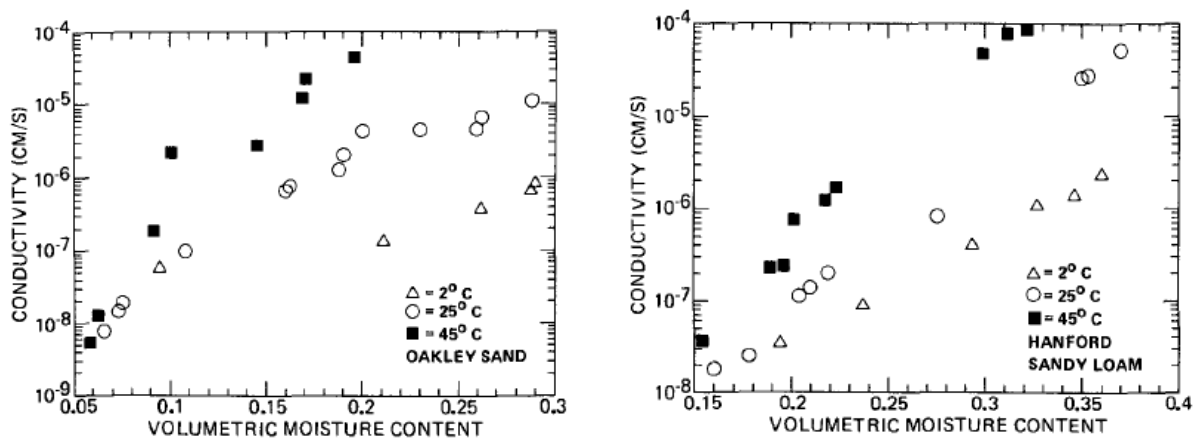
---

<sup>3</sup> Er zijn ook alternatieve modellen hiervoor, zoals beschikbaar in Hydrus (Šimůnek et al., 2009), en uiteraard zijn deze afhankelijk van  $\theta$ .

(poriëngrootteverdeling).<sup>4</sup> Van de viscositeit is bekend dat deze temperatuurafhankelijk is. Daarmee is dus ook de doorlatendheid temperatuurafhankelijk. In Hydrus (Šimůnek et al., 2009) wordt (standaard/optoneel) de doorlatendheid gecorrigeerd voor temperatuur volgens

$$K_T = \frac{\mu_{ref}}{\mu_T} \frac{\rho_T}{\rho_{ref}} K_{ref} \quad (3)$$

waarbij 'ref' verwijst naar een referentietemperatuur, bijvoorbeeld de constante labtemperatuur waarbij de doorlatendheidskarakteristiek is bepaald, en  $\rho$  is de dichtheid van water ( $\text{kg m}^{-3}$ ), welke eveneens afhankelijk is van de temperatuur. Voor deze relatie wordt in Hydrus verwezen naar Constantz (1982). Deze auteur geeft in zijn inleiding aan dat uit voorgaande studies niet eenduidig is gebleken dat de doorlatendheid inderdaad op deze eenvoudige manier gecorrigeerd kan worden: soms gaat het goed en andere keren niet. Uit zijn eigen data blijkt dat deze omrekening niet perfect werkt. Wel blijkt dat zijn gemeten  $K(\theta)$  duidelijk door temperatuur wordt beïnvloed (Figuur 12). Toch wordt in Hydrus gekozen voor deze relatief eenvoudige correctie.



**Figuur 12** Gemeten doorlatendheid als functie van bodemvocht voor drie temperaturen (bron: Constantz, 1982).

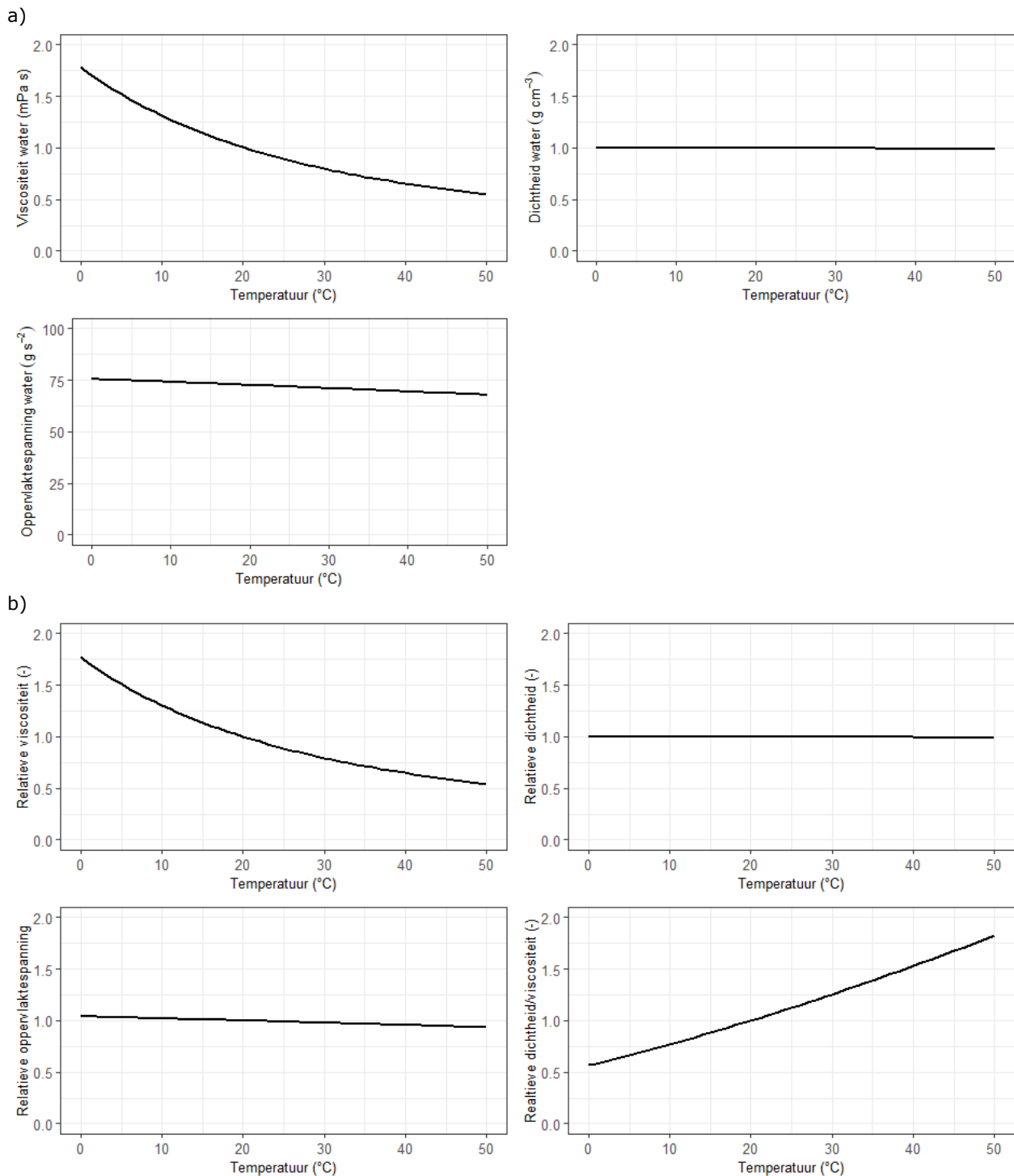
In Hydrus (Šimůnek et al., 2009) wordt (standaard/optoneel) ook rekening gehouden met de invloed van temperatuur op de waterretentiekarakteristiek. Dit gebeurt door de drukhoogte temperatuurafhankelijk te maken volgens

$$h_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{ref}} h_{ref} \quad (4)$$

Hierin is  $\sigma$  de oppervlaktespanning van water ( $\text{N m}^{-1}$ ), die afhankelijk is van de temperatuur.

De temperatuurafhankelijkheden van viscositeit, dichtheid en oppervlaktespanning zijn gegeven in Figuur 2. In absolute en relatieve zin (relatief ten opzichte van  $T = 20^\circ\text{C}$ ) zijn dichtheid en oppervlaktespanning niet erg gevoelig voor temperatuur in de range  $0\text{-}40^\circ\text{C}$ . Dat betekent dat de impact van temperatuur op de drukhoogte (Eq. (4)) gering zal zijn en mogelijk kan worden verwaarloosd. De invloed van de viscositeit gecombineerd met dichtheid op de doorlatendheid (Eq. (3)) is wel duidelijk: ten opzichte van  $T = 20^\circ\text{C}$  zal de doorlatendheid bij  $T = 10^\circ\text{C}$  ongeveer 25% lager zijn en bij  $T = 30^\circ\text{C}$  ongeveer 25% hoger zijn (Figuur 13), diagram rechtsonder).

<sup>4</sup> Deze wordt soms geduid als de intrinsieke doorlatendheid ( $\text{m}^2$ ) die alleen bepaald wordt door de bodemstructuur en onafhankelijk is van de vloeistoffase (dus identiek voor lucht, water, olie); de vloeistofafhankelijkheid komt pas aan de orde wanneer de viscositeit wordt meegenomen.



**Figuur 13** De temperatuurafhankelijkheid van viscositeit, dichtheid en oppervlaktespanning voor water: a) absoluut, en b) relatief ten opzichte van de waarde bij  $T = 20^{\circ}\text{C}$ .

Om een eerste indruk te krijgen wat de invloed van temperatuur is op SWAP-simulaties is het volgende gedaan. Voor een zandgrond met bekende waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken is verondersteld dat deze gelden bij  $T = 20^{\circ}\text{C}$ . Hiermee is periode 2018-2020 (meteo: De Bilt) voor gemaaid gras doorgerekend. Deze simulaties zijn herhaald voor  $T = 10$  en  $30^{\circ}\text{C}$ , waarbij de doorlatendheid bij verzadiging met 25% zijn verlaagd dan wel verhoogd. De broncode van SWAP is dus niet aangepast. De resultaten voor enkele geselecteerde uitvoergrootheden staan vermeld in Figuur 3. In de zomerperiodes zien we dat de grondwaterstand iets dieper uitzakt bij toename van de temperatuur. De drukhoogte op 10 cm laat in de zomer vaak zien dat deze negatiever is bij lagere temperaturen, maar het omgekeerde komt ook voor (zie 2018). De cumulatieve bodemverdamping en gewastranspiratie zijn iets hoger bij hogere

---

temperaturen (Figuur 15). Deze resultaten geven een eerste indruk van een mogelijke bandbreedte. In werkelijkheid varieert de temperatuur gedurende het jaar en verschilt per diepte.

### 3.4 Invloed bodemtemperatuur op bodemprocessen

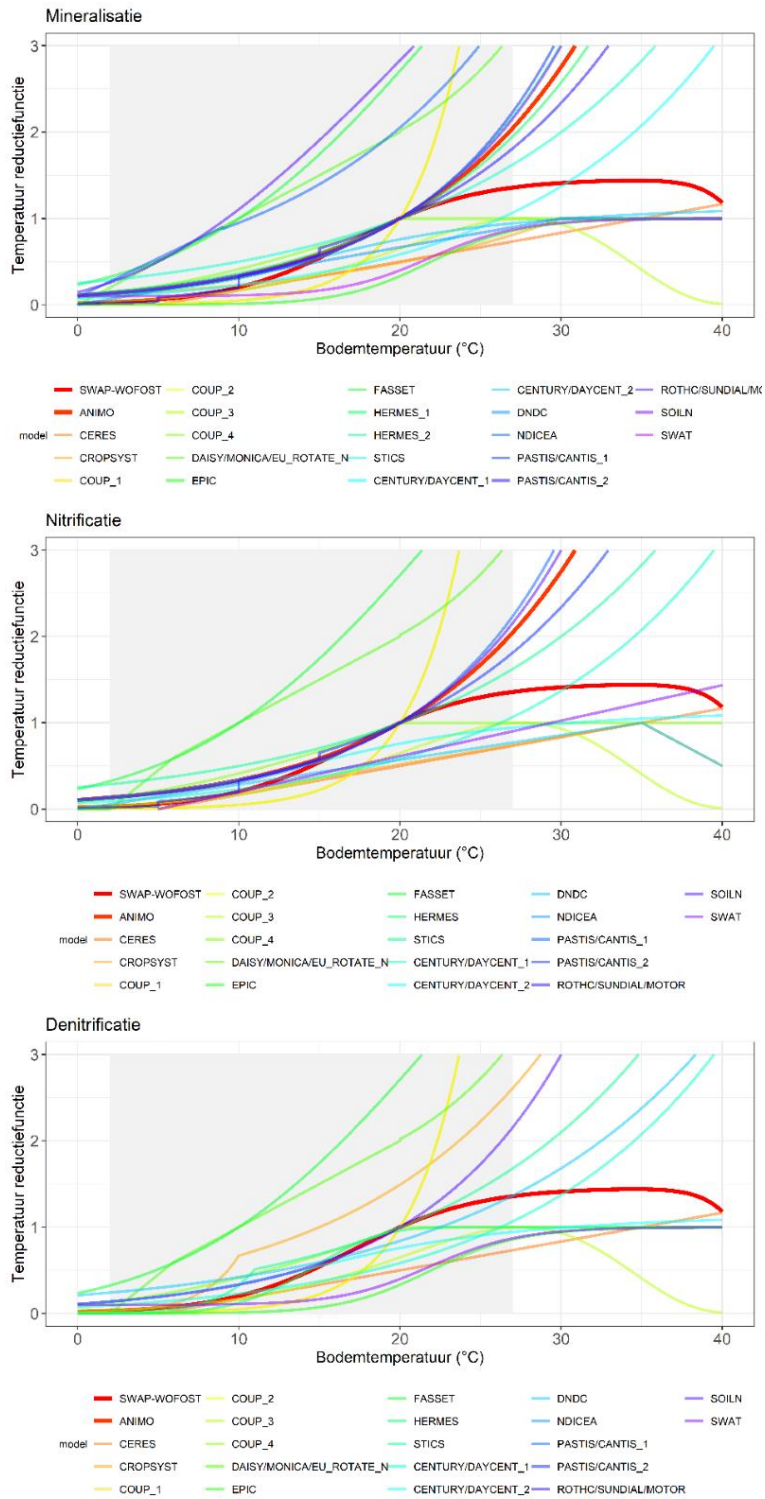
Diverse chemische en biologische deelprocessen in de bodem worden beïnvloed door de bodemtemperatuur. Bai et al. (2013) concludeerden op basis van een meta-analyse (528 waarnemingen, 51 artikelen, 13 variabelen) dat de netto N-mineralisatie en netto N-nitrificatie, respectievelijk 52% en 32% toenamen in de experimentele behandelingen waarin de temperatuur was verhoogd. N-pools namen ook toe, maar minder dan de genoemde N-fluxen. Ook denitrificatie nam significant toe (56%), maar de toename in N<sub>2</sub>O-emissie was niet significant (14%). Microbiële N en microbiële N-immobilisatie werden niet beïnvloed door de opwarming, mogelijk omdat de koolstofbron limiterend was. Zij stelden ook dat deze effecten minder groot zijn in grasland en natuurgebieden en groter in bossen; waarschijnlijk is dat het gevolg van verschillen in de invloed van bodemvocht op genoemde processen in de verschillende soorten landgebruik (graslanden werden droger verondersteld). Landbouwgronden maakten geen deel uit van deze studie.

Klimaatverandering betekent ook dat de bodemvochthuishouding gaat veranderen. In perioden van droogte zal het bodemvocht afnemen. Dat heeft invloed op allerlei bodemprocessen, zoals mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie, maar ook op gewasopname. Onder droge omstandigheden nemen deze processen af. Als gelijktijdig de bodemtemperatuur toeneemt, dan nemen deze processen toe. Wat het netto-effect zal zijn, hangt af van de specifieke af- en toename op basis van vocht en temperatuur.

Zowel bodemvocht als bodemtemperatuur bepaalt in grote mate de mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie in bodems en dat betekent dat simulatiemodellen deze grootheden nauwkeurig moeten kunnen berekenen, zeker ook met het oog op toekomstvoorspellingen op basis van klimaatveranderingen (Salo et al., 2016). Via een quickscan van beschrijvingen van enkele simulatiemodellen zijn de gehanteerde temperatuurreductiefuncties voor de processen mineralisatie (inclusief veenoxidatie), nitrificatie en denitrificatie op een rijtje gezet. Hieruit is duidelijk geworden dat er een grote diversiteit bestaat in deze beschrijvingen. Er is dus geen unieke consensus over de exacte vorm van deze reductiefuncties. In de meeste gevallen wordt in simulatiemodellen een  $Q_{10}$ -, Arrhenius- of exponentiële relatie verondersteld waarbij de processnelheid toeneemt met toenemende temperatuur. Vaak wordt een  $Q_{10}$  van 2 tot 3 gebruikt: elke 10 graden stijging van de temperatuur leidt tot een verdubbeling of verdrievoudiging van het proces. Een  $Q_{10}$ -waarde van 2 of 3 komt overeen met een Arrhenius-constante  $A = 1.07$  of  $1.12$  ( $Q_{10} = A^{10}$ ). Een exponentieel verband is gelijk aan een  $Q_{10}$ -verband met  $Q_{10} = e = 2.718$ . Figuur 14 geeft een overzicht van de verschillende reductiefuncties voor de drie genoemde processen; details zijn te vinden in Bijlage 3.

De reden dat geen eenduidige relaties worden gebruikt, ligt mogelijk aan het feit dat de genoemde processen afhankelijk zijn van diverse factoren (o.a. vochtgehalte, pH, beschikbaarheid energiebron), waar temperatuur er een van is. Het is dan ook niet altijd eenvoudig om alleen het temperatuureffect te isoleren en te kwantificeren. De temperatuurafhankelijke relaties die voor de diverse processen gebruikt worden, lopen boven de 20°C sterk uiteen. Ze zijn meestal wel alle gebaseerd op een  $Q_{10}$ -, Arrhenius- of exponentiële relatie.





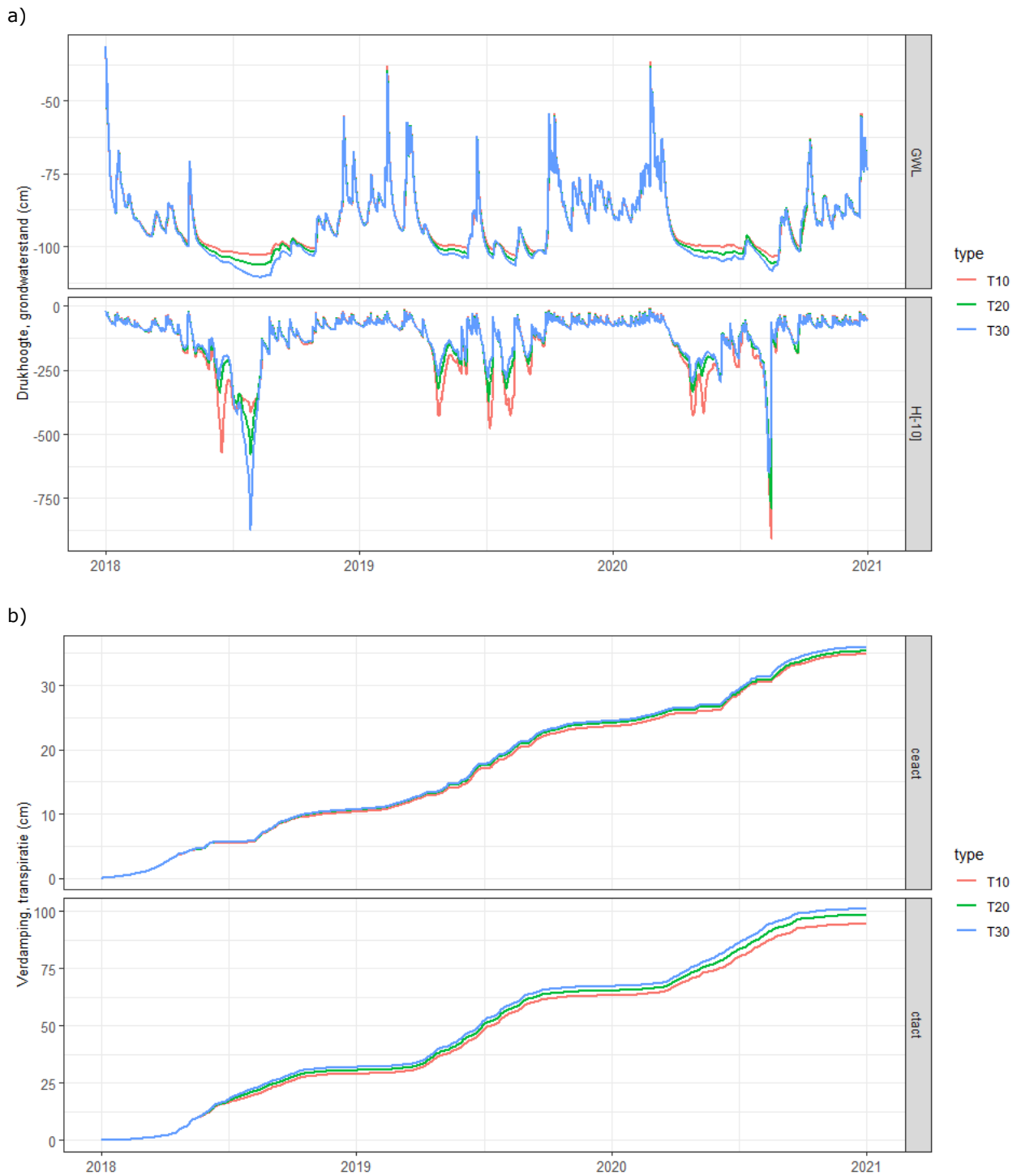
**Figuur 14** Grafische weergave van temperatuurafhankelijkheden voor de processen mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie zoals benoemd in de bijbehorende paragrafen. Het grijs gearceerde gebied geeft de range aan van bodemtemperatuur zoals gemeten op de vier KNMI-meetlocaties [2, 27°C] in de maanden april-oktober op de vijf meetdieptes.

---

## 3.5 Conclusies bodemprocessen

Op basis van het literatuuronderzoek kunnen de volgende conclusies over de invloed van bodemtemperatuur op bodemprocessen worden getrokken:

- De specifieke warmte-eigenschappen (capaciteit, geleiding) van de vaste delen van de bodem (zand, klei, organische stof), de vloeistoffase (water) en lucht kunnen onderling verschillen. Het is vrij algemeen geaccepteerd dat de samengestelde warmte-eigenschappen van bodem-water-lucht-mengsels hieruit kunnen worden afgeleid. Daarmee wordt het mogelijk om warmtetransport in de bodem te berekenen. Omdat het aandeel bodemvocht (water) in de onverzadigde zone varieert in ruimte en tijd, zullen ook die warmte-eigenschappen variëren in ruimte en tijd. Het volumetrische watergehalte heeft dus invloed op de berekening van bodemtemperatuur.
- Omgekeerd geldt ook dat watertransport beïnvloed wordt door bodemtemperatuur. Het is minder aannemelijk dat dit gaat via vloeistoftransport onder invloed van temperatuurgradiënten (hoewel soms toch zo toegepast). Het lijkt wel aannemelijk dat temperatuur van invloed is op met name de doorlatendheid (zowel voor water als ook voor waterdamp) via de temperatuurafhankelijkheid van de eigenschappen van water (met name de viscositeit).
- De bodemtemperatuur is een van de factoren die meespeelt in bodemprocessen zoals o.a. mineralisatie, veenoxidatie en denitrificatie. In zijn algemeenheid geldt dat een stijging van de bodemtemperatuur tot een versnelling van bodemprocessen leidt. In de meeste gevallen wordt in simulatiemodellen een  $Q_{10}$ -, Arrhenius- of exponentiële relatie verondersteld, waarbij de processnelheid toeneemt met toenemende temperatuur. Vaak wordt een  $Q_{10}$  van 2 tot 3 gebruikt: elke 10 graden stijging van de temperatuur leidt tot een verdubbeling of verdrievoudiging van het proces.
- Klimaatverandering betekent ook dat de bodemvochtthuishouding gaat veranderen. In perioden van droogte zal het bodemvocht afnemen. Dat heeft invloed op allerlei bodemprocessen, maar ook op gewasopname. Onder droge omstandigheden nemen deze bodemprocessen af. Als gelijktijdig de bodemtemperatuur toeneemt, dan nemen deze bodemprocessen toe. Wat het netto-effect zal zijn, hangt af van de specifieke af- en toename op basis van vocht en temperatuur. Dit betekent dat beide factoren van belang zijn bij het doen van voorspellingen naar veranderingen van bodemprocessen.

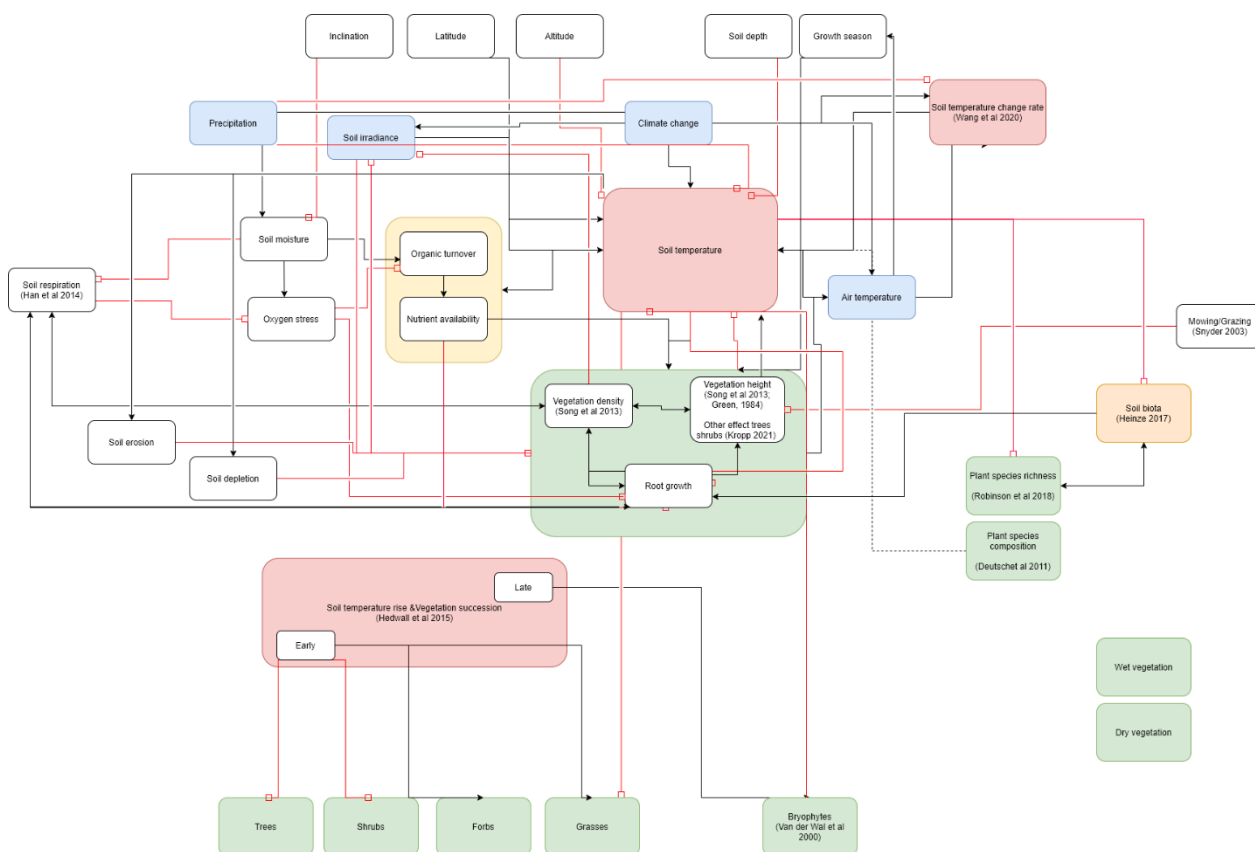


**Figuur 15** De invloed van temperatuur op a) grondwaterstand (GWL) en drukhoogte op -10 cm (H[-10]) en b) cumulatieve bodemverdamping (ceact) en cumulatieve gewasverdamping (ctact) zoals gesimuleerd met SWAP door de invoerparameter  $K_{sat}$  aan te passen (zie tekst).

# 4 Natuurontwikkeling en bodemtemperatuur

## 4.1 Inleiding

De temperatuur van de bodem bepaalt zowel biotische als abiotische processen in de bodem. Dit kan betrekking hebben op de beschikbaarheid van water en nutriënten voor planten alsook op de processen die zorgen voor de opname van water en nutriënten. Bodemtemperatuur is daarbij niet alleen een sturende factor, maar wordt zelf sterk beïnvloed door de randvoorwaarden die het milieu stelt, zoals luchttemperatuur, klimaat, weer (neerslag!), bodemstructuren, hydrologie etc. De bodemtemperatuur kan directe en indirecte effecten op de plantengroei hebben en daarmee op de vegetatie. Omgekeerd kan ook de vegetatie een direct en indirect effect hebben op de bodemtemperatuur. Door dit enorme complex aan factoren (Figuur 16) is het ontleden van het effect van bodemtemperatuur op de natuurlijke ontwikkeling van vegetatie een zeer ingewikkelde opgave. In deze theoretische studie proberen we een kort overzicht te geven wat de rol van bodemtemperatuur is op de natuurlijk plantengroei, hoe dit vegetatie kan beïnvloeden en hoe een verandering in bodemtemperatuur invloed zal hebben op vegetatie in Nederland. Doordat er weinig onderzoek gedaan is naar de effecten van bodemtemperatuur op planten en bodemleven in Nederland, proberen we de resultaten van buitenlands onderzoek te duiden voor de Nederlandse situatie.



**Figuur 16** Versimpeld (en niet compleet) complex van factoren dat invloed heeft op de interactie tussen bodemtemperatuur en vegetatie.

---

## 4.2 Bodemtemperatuur en plantengroei

Planten zijn afhankelijk van de abiotische én de biotische omstandigheden op de plek waar ze groeien. Al deze factoren kunnen van invloed zijn op de verschillende stadia in de levenscyclus van planten: zaad, kieming, groei en voortplanting.

Ooi et al. (2009) laten zien dat de bodemtemperatuur veranderingen in de luchttemperatuur volgen. Maar in hoeverre de bodemtemperatuur verandert, is afhankelijk van verschillende bodemparameters. Doorgaans volgt de bodemtemperatuur de luchttemperatuur, soms met enige vertraging. Maar er zijn ook aanwijzingen dat in droge gebieden een stijging van 5°C van de lucht een bodemtemperatuurstijging van 8°C kan veroorzaken (niet-Nederlandse situatie), terwijl vochtige bodems een grote buffercapaciteit hebben tegen temperatuursveranderingen.

De fysiologie en het metabolisme van planten worden voor een groot deel bepaald door de temperatuur. De wortelgroei en de wortelontwikkeling van planten zijn afhankelijk van de temperatuur. Doorgaans neemt de groei van wortels toe naarmate de temperatuur oploopt. Bij temperaturen hoger dan 30°C neemt de groei doorgaans af in veel gewassen (Kaspar & Bland, 1992). Voor wilde flora is hier weinig over bekend.

Tevens heeft de bodemtemperatuur een direct effect op de biosfeer rondom de plantenwortels. Bij bodemtemperaturen van onder de 5°C wordt er gesproken over een biologisch nulpunt of een *biological zero* (Rabenhorst, 2005). Zowel metabole processen, bijvoorbeeld enzymatische reacties, als de microbiële activiteit worden doorgaans positief beïnvloed door hogere temperaturen, ca. 10 tot 28°C. Echter kunnen te hoge temperaturen juist een negatief effect teweegbrengen. Voor bodemgebonden microbiële processen wordt doorgaans een optimumtemperatuur tussen de 10 en 36°C aangehouden. Binnen dit bereik is er tevens een positieve relatie tussen de temperatuur en de afbraak van organisch materiaal, indien er geen andere limiterende omstandigheden zijn. Daarnaast heeft ook macrofauna in de bodem invloed op bodemprocessen, bijvoorbeeld de afbraak van strooisel en de structuur van de bodem. Macrofauna is doorgaans actief bij temperaturen tussen de 0 en de 58°C.

De bodemtemperatuur in de winter is deels bepalend voor het voorkomen van plagen in het voorjaar of het overleven van de eitjes of larven van insecten. Bij relatief warme winters met hoge bodemtemperaturen overleven er meer larven van onder andere bladsprietkevers, kniptorren en wortelvliegen die in het vroege voorjaar de jonge (scheuten van) van planten snel weten te bereiken. Een stijging in de bodemtemperatuur vervoegt de activiteit van het bodemleven en daarmee ook de schadelijke effecten op de vegetatie.

Bij een verhoging van de temperatuur worden veel chemische verbindingen mobieler. Voor nutriënten voor planten, bijvoorbeeld fosfaat, betekent dit dat de voedingsstoffen gemakkelijker op te nemen zijn. Daarnaast kan de pH tijdens hogere temperaturen iets toenemen (Mensies et al., 2003). Het verhoogde metabolisme van het microbioom leidt vaak tot een hogere uitstoot van CO<sub>2</sub>, wat mogelijk tot een verminderde zuurstofbeschikbaarheid in de bodem leidt.

In kleiige condities kan een toename van de temperatuur leiden tot kleinere deeltjes. Hoewel klei uit zichzelf uit kleine deeltjes bestaat, aggregeren kleideeltjes gemakkelijk, waardoor er grotere, meer zandachtige structuren ontstaan. Bij opwarmingsprocessen zoals uitdroging worden deze deeltjes kleiner en nemen meer het formaat van silt aan, wat leidt tot bodemverdichting. Deze verdichting kan vervolgens leiden tot een andere waterhuishouding, beschikbaarheid van voedingsstoffen en mogelijkheden voor doorworteling. Hierdoor kan verdamping door hogere temperaturen echter verminderen.

## 4.3 Bodemleven en temperatuur

Bodemleven is de basis voor veel ecosysteemfuncties. Inmiddels zijn er honderden publicaties over effecten van klimaatverandering, maar een beperkt aantal met de focus op verhoogde bodemtemperatuur. In enkele reviews van wetenschappelijke literatuur (Singh et al., 2010; Park et al., 2014) worden uiteenlopende effecten op ondergrondse levensgemeenschappen genoemd. In subarctische ecosystemen neemt de relatieve hoeveelheid schimmels af en verandert de samenstelling van de bacteriële gemeenschap bij opwarming. Een andere experimentele studie op een verlaten landbouwgrond in een gematigd klimaat vertoonde een toename van de hoeveelheid schimmels bij een met 3°C verhoogde temperatuur (Castro et al., 2010).

---

Opwarming kan de kolonisatie van wortels door mycorrhiza bevorderen, door een verhoogde groei van zowel de schimmel als de waardplant. Ook hier zijn andere milieufactoren van belang. Zo kan een verandering in neerslag sterkere effecten hebben op bodembiota dan een verhoogde bodemtemperatuur of CO<sub>2</sub>-gehalte van de lucht.

In semi-aride graslanden stimuleerde verhoogde neerslag de ophoping van microbiële residuen (Shao et al., 2018). Deze aminosuikers werden gebruikt als biomarker waarmee effecten van gesimuleerde klimaatverandering op koolstof van microbiële oorsprong werden onderzocht. Een groot deel van de organische C in de bodem is afkomstig van moeilijk afbreekbare microbiële resten zoals celwanden van met name schimmels. Opwarming leidde tot verlies van microbiële residuen. De significante respons van schimmelresiduen op neerslag werd toegeschreven aan een sterke afhankelijkheid van schimmels van de plantproductie. Er was geen verandering in bacteriële residuen, voornamelijk door de snelle *turnover* (groei en afbraak) en aanpassing (adaptatie) aan opwarming. De sterkere respons op microbiële residuen dan op totaal C in de bodem wijst erop dat de samenstelling en stabiliteit van koolstofverbindingen veranderen voordat de koolstofvastlegging verandert.

#### *Boreale bossen*

Sterke effecten van klimaatverandering worden met name verwacht in toendra en boreale ecosystemen. Effecten van verhoogde temperatuur (+0.5°C) en afname in bodemvochtgehalte (-22%) werden onderzocht in een experiment met overkappingen (closed-top greenhouses) in een volwassen bos met Zwarte spar in Alaska (Allison en Treseder, 2008). De hoeveelheden bacteriën en schimmels in de bodem namen af met meer dan 50%. Er was een trend naar lagere activiteit van het chitine afbrekende enzym N-acetylglucosaminidase. Chitine is een bestanddeel uit de celwand van schimmels. De bodemrespiratie nam af tot 50%, maar alleen laat in het groeiseizoen. Dit ging gepaard met significante verschuivingen in de structuur (samenstelling) van de actieve schimmelgemeenschap. Er was een marginaal verhoogde beschikbaarheid van ammonium en nitraat en een marginale verhoging van de diversiteit van actieve schimmels. Dit experiment was niet-factorieel opgezet, zodat effecten van vocht en temperatuur niet kunnen worden onderscheiden. Het is te verwachten dat veranderende schimmelgemeenschappen effect hebben op het functioneren of de samenstelling van de plantengemeenschap.

#### *Heide in gematigd klimaat*

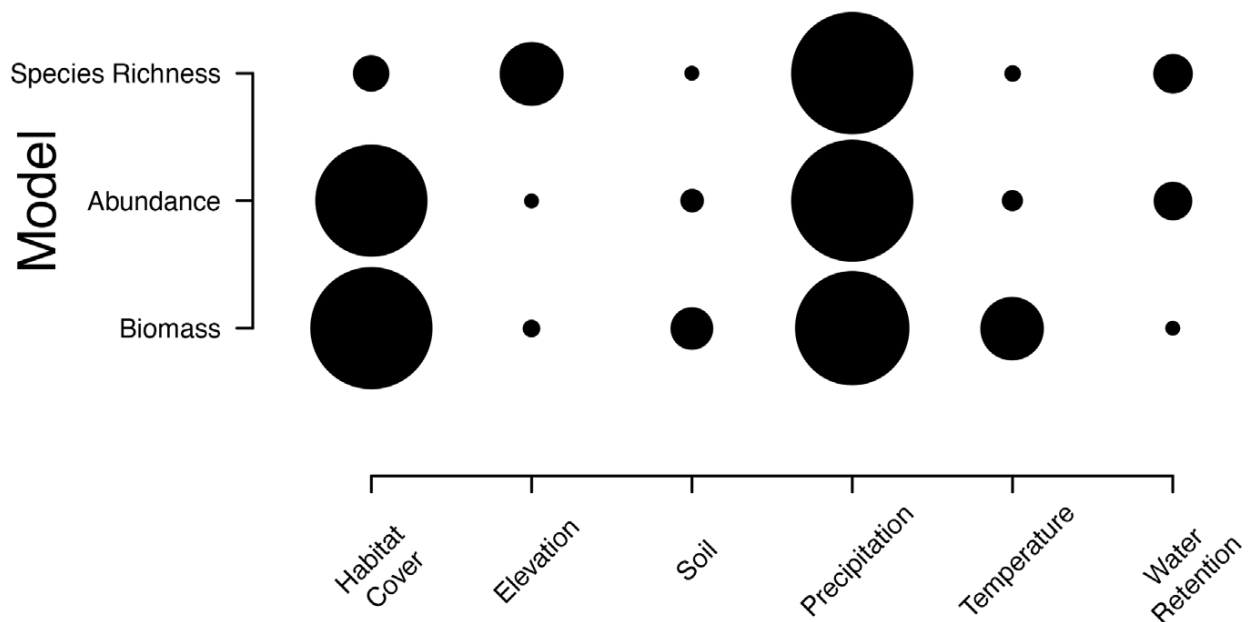
Effecten van vocht en temperatuur konden wel worden onderscheiden in een grootschalig experiment in een heideveld met een gematigd klimaat in Denemarken (Haugwitz et al., 2014). Hier werd het effect van vijf jaar klimaatverandering en een verhoogd CO<sub>2</sub>-gehalte op bodemmicro-organismen onderzocht. Een veranderd klimaat werd gesimuleerd door een verhoogde bodemtemperatuur (+0,3°C), een verlengde zomerdroogte (vermindering jaarlijkse neerslag met 5-8% en een verhoogd atmosferisch CO<sub>2</sub>-gehalte (+130 ppm) in een factoriële opzet. De opwarming leidde tot grotere (1) hoeveelheden DNA van schimmels en bacteriën (2) microbiële biomassa en (3) potentiële groeisnelheid (na toevoeging van glucose). Dit leidde niet tot verminderde beschikbaarheid van stikstof en fosfor in de bodem die zou kunnen optreden door vastlegging in microbiële biomassa. Droogte veroorzaakte een verschuiving naar schimmeldominantie en een verhoogde beschikbaarheid van NH<sub>4</sub>-N, waarschijnlijk door verminderde plantopname. Er konden geen sterke interacties tussen de factoren temperatuur, droogte en CO<sub>2</sub> worden aangetoond. Deze en andere studies in droge, nutriëntenarme ecosystemen suggereren dat opwarming en schommeling in bodemvocht de sterkste sturende factoren zijn van nutriëntenbeschikbaarheid en microbiële gemeenschappen in de (droge) heidebodem. Snellere fluctuaties in bodemvocht kunnen leiden tot het snel vrijkomen van grotere hoeveelheden (pulsen) opgelost organisch koolstof (DOC) en nutriënten in de bodem door osmolyse en afbraak van microbiële biomassa. Gecombineerd met grotere microbiële aantallen en biomassa door opwarming kunnen deze nutriëntenpulsen nog groter worden. Een grotere microbiële biomassa en groeisnelheid kunnen potentieel de afbraak van organische stof in de bodem versnellen en op langere termijn de koolstofbalans en nutriëntenstromen van het ecosysteem veranderen.

Omdat droge heidesystemen nutriëntenarm zijn, zijn ze kwetsbaar voor zowel verhoogde nutriëntenbeschikbaarheid als grotere pieken (pulsen) van nutriënten, die negatieve effecten kunnen hebben op het dominante Struikhei (*Calluna vulgaris*) en sneller groeiende grassen stimuleren. In tegenstelling tot de microbiële gemeenschap in de bodem bleek de heidevegetatie in deze studie betrekkelijk weerbaar tegen de klimaatmanipulaties. De verschillen in bovengrondse en ondergrondse effecten na vijf jaar gesimuleerde

klimaatverandering kunnen komen door een verschillende responstijd van planten en micro-organismen (Bardgett et al., 2013). De verwachting is dat verhoogde nutriëntenbeschikbaarheid en fluctuaties het grootste effect op het ecosysteem zullen hebben op een langere tijdschaal. Omdat sneller groeiende grassen worden bevoordeeld, kan de turnover van nutriënten verder worden versneld als gevolg van makkelijker afbreekbare plantenresten, waardoor het hele ecosysteem zal veranderen en minder nutriënten en koolstof worden vastgelegd (Haugwitz et al., 2014).

#### Regenwormen

Naast bacteriën en schimmels vormen regenwormen een relatief groot deel van de totale hoeveelheid bodemleven, met name in voedselrijkere bodems. Ze stimuleren de microbiële activiteit en dragen bij aan nutriëntenkringlopen, bodemstructuur en waterhuishouding. Meer nog dan de bodemeigenschappen zijn klimaatvariabelen van belang voor regenwormen. Neerslag en vegetatiebedekking zijn de belangrijkste bepalende factoren voor de aantallen, biomassa en soortenrijkdom. Daarnaast heeft de temperatuur een belangrijke invloed op met name de biomassa (Figuur 17).



**Figuur 17** Het belang van zes typen variabelen op basis van drie biodiversiteitsmodellen. De drie rijen tonen de resultaten van elk model, van boven naar beneden: soortenrijkdom, aantal en biomassa. De kolommen vertegenwoordigen de variabelen in de modellen. De belangrijkste heeft de grootste cirkel. Binnen elke rij is de grootte van de cirkel evenredig met het relatieve belang van de variabele. Verhoudingen kunnen dus alleen binnen een rij worden vergeleken. (Uit: Phillips et al., 2019.)

Klimaatverandering zal waarschijnlijk de aantallen en biomassa eerder beïnvloeden dan de diversiteit, omdat dit laatste afhangt van de snelheid waarmee de regenwormen zich kunnen verspreiden. Die is relatief laag bij regenwormen. De resultaten suggereren dat klimaatverandering substantiële effecten kan hebben op regenwormen en de functies die ze vervullen. Veranderingen in regenwormen werken waarschijnlijk door (cascade-effecten) naar andere groepen organismen in de bodem en het functioneren van ecosystemen (Phillips et al., 2019).

## 4.4 Natuurlijke Vegetatie en bodemtemperatuur

Er is weinig onderzoek gedaan naar de effecten van bodemtemperatuursverandering op de natuurlijke vegetatie. In het bijzonder in natuurlijke situaties. De bulk van het ecologisch onderzoek waarbij bodem en vegetatie wordt onderzocht richt zich op de effecten van vegetatie op bodemtemperaturen (Way et al., 2021; Lozano-Parra et al. 2018; Oliver et al., 1987). De onderzoeken die zijn uitgevoerd richten zich doorgaans op

---

koele tot koude omgevingen zoals bergachtige gebieden of gebieden richting de poolcirkel. Zo verwacht bijvoorbeeld Choler (2018) dat een opwarming van een bodem in hooggelegen gebieden ervoor kan zorgen dat de begroeiingsgrenzen op noordelijk geëxponeerde hellingen zullen dalen door het bevriezen van de grond bij minder sneeuwbedekking (hogere bodemtemperatuur), terwijl op de zuidelijk geëxponeerde hellingen de begroeiingsgrens stijgt door langere groeiseizoenen. Robinson et al. (2018) vonden dat bij een bodemtemperatuurstijgingsexperiment in IJsland, waarbij de temperatuur met ca. 20 °C (van 10 naar 30 °C) werd verhoogd, de diversiteit van planten en invertebraten achteruitliep, hoewel de biomassa constant bleef (hoewel dit per individu afnam). Bij planten was het effect het sterkst te merken tijdens de ontkiemings- en jonge zaailingfase van de onderzochte planten.

Een, eveneens, IJslands onderzoek vond dat bij een stijging van de temperatuur in graslanden, het aandeel van de grassen afneemt, terwijl dat van de kruiden toeneemt (Warner et al., 2021). Wel reageren grassen sneller op bodemtemperatuur dan kruiden en zullen sneller investeren in bovengrondse biomassa (Brooker & Van der Wal, 2003). Dezelfde temperatuurstijging had geen effect op de mosbedekking. Mogelijk speelt droogteresistentie hier ook een rol. Grassen wortelen doorgaans oppervlakkiger dan kruiden en zullen tijdens hogere bodemverdamping ook eerder droogtestress ondervinden. Tevens nam het strooisel af, mogelijk door een versnelde afbraak, waardoor de opwarming van de bodem door uitdroging en instraling werd versterkt. Daarnaast neemt de ondergrondse competitie om voedingsstoffen af (door een hogere turnover), waardoor de ondergrondse biomassa iets zal afnemen (met mogelijk een hogere gevoeligheid voor droogte) (Wilson & Tilman, 1993). Daartegenover staat dat er meer wordt geïnvesteerd in bovengrondse biodiversiteit, mede door de toegenomen lichtcondities en beschikbare stikstof (Wang et al., 2016). Dit zorgt met name voor een toename in de bovengrondse biomassa van vaatplanten, mogelijk ten koste van de laagblijvende mossen en korstmossen. De moslaag speelt in verschillende vegetatietypen een belangrijke rol. In veengebieden is de moslaag het belangrijkste substraat voor andere soorten om zich in te vestigen, terwijl in veel droge graslanden ook een hoog aandeel mossen en korstmossen is te vinden. Deze moslaag fungeert als een beschermlaag van de bodem. Naast bescherming tegen wind en erosie zorgt de moslaag voor het vasthouden van vocht. Daarbij verlaagt de moslaag de bodemtemperatuur in de zomer, terwijl de laag juist warmte vasthoudt tijdens de winter (Xiao et al., 2013).

Bovendien zal bij een verhoogde bodemtemperatuur het groeiseizoen langer zijn, waardoor er meer bovengrondse biomassa wordt gevormd (Natali et al., 2012). Het is mogelijk dat dit ook voor vegetatie in Nederland het geval zal zijn en dat de bovengrondse productiviteit stijgt. Dit kan over het algemeen leiden tot verruiging of vergrassing in meer open vegetatietypen en graslanden. Hierbij is het mogelijk dat toch al productieve soorten hierbij een voordeel hebben boven soorten die trager of minder groeien. In sommige gevallen zou dat kunnen betekenen dat toch al concurrentiekrachtige plantensoorten de kleinere soorten overwoekeren en wegconcurreren. Daar staat tegenover dat een verminderde ondergrondse biomassa ook kan leiden tot een meer kwetsbare vegetatie. Bij weersextremen waarbij hogere temperaturen, droogte of erosie optreden, kunnen planten een nadeel ondervinden bij een relatief klein wortelstelsel. Hierdoor is een plant beperkt in de opname van water, de bereikbaarheid van water (en nutriënten) en daarnaast kan ook de verankering in het substraat minder zijn waardoor een plant sneller uitspoelt, uitgetrokken wordt of omwaait.

## 4.5 Bodemtemperatuur en zaden

Naast de ontwikkeling van natuurlijke vegetatie die het beeld en de functionele structuur vormen van de Nederlandse natuur, moet er ook gekeken worden naar de effecten van bodemtemperatuurverandering op de bouwstenen, de natuurlijke populaties van planten. Het duurzaam voortbestaan van populaties wordt naast de voortplanting en overleving ook bepaald door verspreiding en die verspreiding vindt doorgaans plaats door middel van zaden. Bij zaadverspreiding is niet alleen verspreiding door de ruimte van belang, maar zeker ook verspreiding door de tijd. Kieming en kiemsucces worden daarbij vaak bepaald door omgevingsprikkels als licht en temperatuur, maar ook de levensvatbaarheid van zaden, de tijd dat een zaad kiemkrachtig blijft, is afhankelijk van het milieu (Ozinga et al., 2004). In de natuur vindt de opslag van zaden plaats in natuurlijke zaadbanken in de bodem. Geschikte kiemomstandigheden bepalen wanneer zaden ontkiemen en zich ontwikkelen tot zaailingen en uiteindelijk volwassen planten. Kieming kan plaatsvinden binnen een jaar na zaadsetting (seizoensbepaald), terwijl de zaden van andere soorten vele jaren (of zelfs decennia) in de grond kunnen overleven. Zaadbanken kunnen geactiveerd worden door natuurlijke of mechanische processen, waarbij de bodem wordt opengehaald of geplagd. Licht- en temperatuursveranderingen kunnen de zaden vervolgens tot kieming bewegen. De levensduur van



---

plantenzaden is voor een deel afhankelijk van de bodemtemperatuur. Ex situ worden zaden doorgaans onder koude condities opgeslagen. Bij 4°C, zonder enige stimulans om te kiemen, zijn de meeste zaden enkele maanden tot enkele jaren kiemkrachtig te houden. Voor de langere opslag, van enkele jaren tot decennia, worden zaden, luchtdicht, ingevroren bij -20°C. Sommige soorten zijn juist gebaat bij lagere temperaturen. Voornamelijk bij eenjarigen en pioniersoorten dienen de zaden een 'koude-shock' te ondergaan aler de kieming in gang wordt gezet. Deze koude-shock is het gevolg van een sterke daling in de bodemtemperatuur ten gevolge van de winterkou.

Ooi et al. (2012) onderzochten hoe luchttemperatuur de bodemtemperatuur beïnvloedt en vonden hierbij dat bij elke toename van 1°C de gemiddelde bodemtemperatuur met 1,5°C steeg. Daarbij testten zij onder laboratoriumomstandigheden of de kiemrust van zaden van lokale vlinderbloemigen werd beïnvloed door de temperatuursverandering van de bodem. Op langere termijn was er geen effect gevonden en was er geen effect op de kiemkracht van zaden indien de temperatuur gemiddeld enkele graden steeg. Echter wanneer er een gemiddelde temperatuurstijging plaatsvond in de bodem die werd veroorzaakt door temperatuursextremen, waarbij de lucht en de bodem zeer warm werden, kon dit de kiemkracht van de zaden negatief beïnvloeden. Dit zal ook voor Nederlandse omstandigheden gelden. Kleine temperatuursverhogingen zullen geen significant effect hebben op de levensvatbaarheid van zaden. Echter als die verandering vooral wordt bepaald door extremen, kan deze tijdelijke stress een negatief effect hebben op de levensvatbaarheid voor zaden in bodem. Dit zou de samenstelling van de vegetatie en ook de populatiedynamiek van de soorten op termijn kunnen beïnvloeden. Dit zal echter zeer verschillend uitpakken voor verschillende begroeiingstypen en locaties.

Voor koudekiemers zullen de effecten het grootst zijn. Sommige zaden hebben een koudeprikkel nodig om uit de kiemrust te geraken. Vaak is slechts een koude periode van een aantal dagen genoeg om de kiemrust te doorbreken. Temperaturen van beneden de 5-10°C zijn doorgaans genoeg. Waarschijnlijk zijn juist de temperatuurswisselingen door het seizoen de inducerende factor. Enkele soorten hebben vrieskou nodig om de zaadruist te doorbreken, dit geldt bijvoorbeeld voor enkele soorten uit de Ranonkelfamilie. Wanneer de gemiddelde bodemtemperatuur stijgt, zullen de effecten van de atmosferische fluctuaties in de temperatuur verminderen. Hierdoor wordt mogelijk het 'kiemsignaal' minder duidelijk voor de zaden, waardoor er in het algemeen een lichte achteruitgang in kieming van plantensoorten te verwachten valt.

Echter, het negatiefste klimaatscenario gaat uit van 3,9°C stijging in de bodemtemperatuur in de komende 100 jaar (IPCC, 2007). Hierdoor zullen temperaturen niet onder de minimale lokale kiemingstemperaturen, maar ook niet boven de maximale kiemingstemperaturen komen (Ooi et al., 2011). Veranderingen in neerslag (en hydrologie) ten gevolge van klimaatverandering zijn dus sturend in veranderingen in de kieming van planten (Dantas et al., 2020). Daarnaast volgen veel plantensoorten een bet-hedging strategie. Hierbij kiemen niet alle zaden onder optimale omstandigheden, maar blijft een deel slapende. Dit deel kan kiemen bij minder geschikte omstandigheden, waarmee de soort een voordeel heeft ten opzichte van planten die alleen bij optimale omstandigheden kiemen (Childs et al., 2010).

Daarnaast kan de fenologie van plantensoorten worden beïnvloed door veranderingen in de bodemtemperatuur. Zeker in vegetaties die duidelijk seizoenale karakteristieken hebben, bijvoorbeeld in de kweldergemeenschappen, zijn deze effecten goed te meten. Zo maten O'Connell et al. (2020) dat bij een toename van 1,7°C kweldergrasvegetatie ca. 11 dagen eerder gaat groeien over een periode van zestig jaar. Waarschijnlijk speelt de bodemtemperatuur een belangrijke rol in de fenologie van geofyten. In bossen is bodemtemperatuur minder van invloed op de groei, maar kan wel effect hebben op het tijdstip van de bloei (Farnsworth et al., 1995).

Het actief worden van bestuivers, zeker de in de grond nestelende bijen, wordt ook door de bodemtemperatuur bepaald (Kudo & Cooper, 2019). Bij een stijging van de bodemtemperatuur zullen insecten eerder en langer actief zijn. Dit kan positieve gevolgen hebben voor voorjaarsbloeiers, waar de bestuiving toe zal nemen door een grotere beschikbaarheid aan bestuivers, aangenomen dat de bloeiperiode van vroege voorjaarsbloeiers (zoals Bosanemoon (*Anemone nemorosa*) eveneens vervroegd en mogelijk verlengd wordt. Indien er door verhoogde mineralisatiesnelheden verzuuring ontstaat, kan dit een negatief effect hebben op veel ongewervelden. Naast een verminderd voedselaanbod door diversiteitsverlies in de vegetatie, is het microklimaat ook minder geschikt voor de ontwikkeling van in de bodem gelegde eieren, zoals die van veel Nederlandse Sprinkhanen (Nijsen et al., 2014).

## 4.6 Nederlandse vegetatie en bodemtemperatuur

Voor het in kaart brengen van de verspreiding van de Nederlandse wilde flora worden de fysisch-geografische regio's (FGR's) doorgaans als basis genomen. Een deel van deze indeling wordt bepaald door de natuurlijke verspreiding van plantensoorten, maar de bodemtypering is hierin vaak leidend en is doorgaans indicatief voor het voorkomen van plantensoorten. Nederland wordt opgedeeld in een vijftiental ecodistricten in negen fysisch-geografische regio's (Figuur 18): Drents district, Gelders district, Kempens district, Vlaams district, Subcentreurop (Hogere zandgronden (of Pleistocene districten) ), Zuid-Limburgs district (Heuvelland), Noordelijk kleidistrict, IJsselmeerpolders (Zeeklei), Laagveendistrict (Laagveen), Fluviaal district (Rivierengebied), Renodunaal, Waddendistrict (Duinen), Estuarien district (Afgesloten zeearmen), Maritiem district en Urbane gebieden.

Met name de zandige districten (Hogere zandgronden en duinen) zullen snel reageren op veranderingen in de luchttemperatuur. De vochtigere klei- en veenbodems zijn deels gebufferd tegen temperatuurfuctuaties, met name wanneer het vochtgehalte grondwater gestuurd is (Fernández-Pascual et al., 2015), zoals dat in grote delen van ons land het geval is. Ook de urbane gebieden waarbinnen de vegetatie zich vaak op droge plekken of in pionierssituaties bevindt, zullen sterker reageren op temperatuursveranderingen.

Temperatuurextremen komen hier geregeld voor waarbij temperaturen zowel extreem hoog ( $> 50^{\circ}\text{C}$ ) of erg laag zijn. Hierbij moet opgemerkt worden dat in stedelijke gebieden de temperaturen al enkele graden (tot ca.  $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$  in de urbane hitte-eilanden) hoger zijn vergeleken met de omliggende gebieden (Price et al., 1979). Omdat het hier gaat om kunstmatige oppervlakten, zal een door klimaatverandering geïnduceerde stijging van de bodemtemperatuur hier geen gelijke rol spelen vergeleken met de buitengebieden.



**Figuur 18** Floradistricten in Nederland (Duistermaat, 2020).

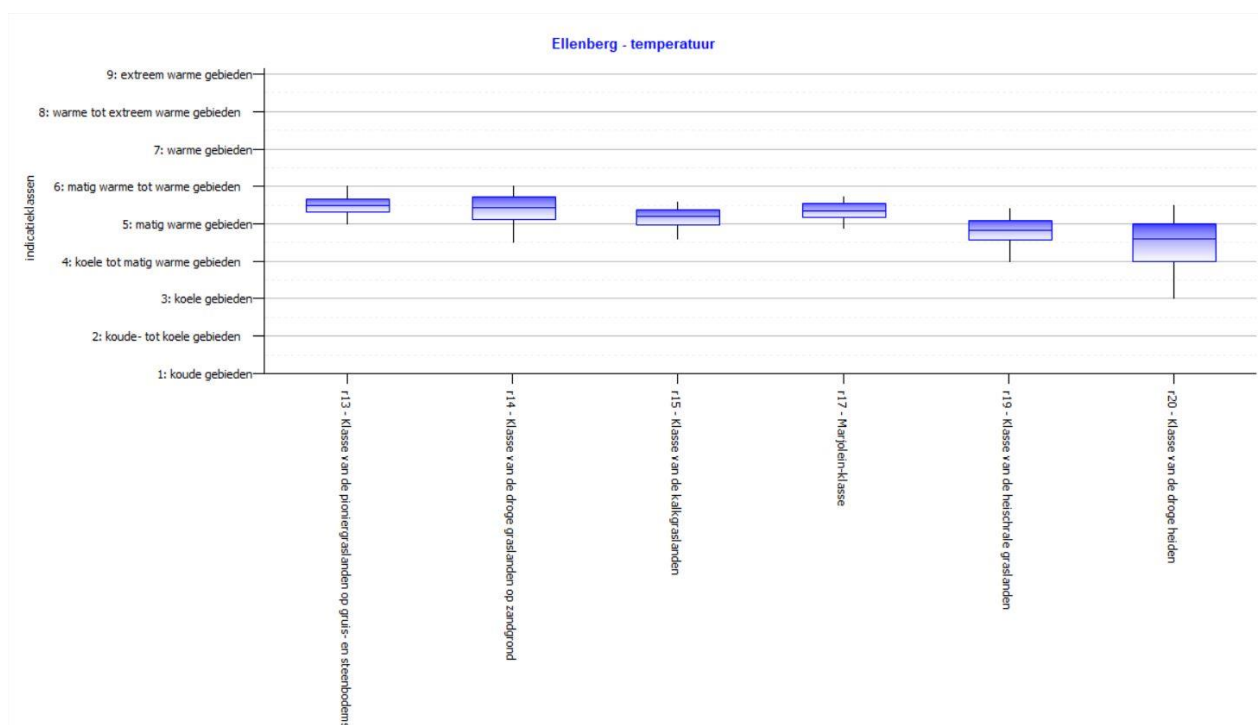
Een verhoging van de bodemtemperatuur zal in het algemeen leiden tot drogere omstandigheden. Met name de soorten die relatief oppervlakkig wortelen, zullen gevoelig zijn voor temperatuursverhogingen. Denk

hierbij aan pionierssituaties en de reeds droge (kruidenrijke) graslanden. In vegetaties met dieper wortelende soorten zal een temperatuurstijging van de bodem relatief weinig effect hebben op de doorworteling. Bovendien worden diep wortelende vegetaties over het algemeen gekarakteriseerd door hoog opgaande en zeer bedekkende begroeiing (bossen, ruigten, zomen en struwelen). Deze bovengrondse begroeiing heeft ook een direct bufferend effect op de bodemtemperatuur door het belemmeren van instraling van zonne-energie.

De in Nederland aanwezige vegetatietypen met een open karakter reageren daarmee, in theorie, het snelst op een temperatuurstijging van de bodem. De open vegetaties zijn gevoeliger voor verdroging, maar ook voor verzuuring. Dit laatste zal vooral voorkomen op plekken waar water geen limiterende factor is.

Voor Nederland zijn de gevoeligste vegetatieklassen dan ook:

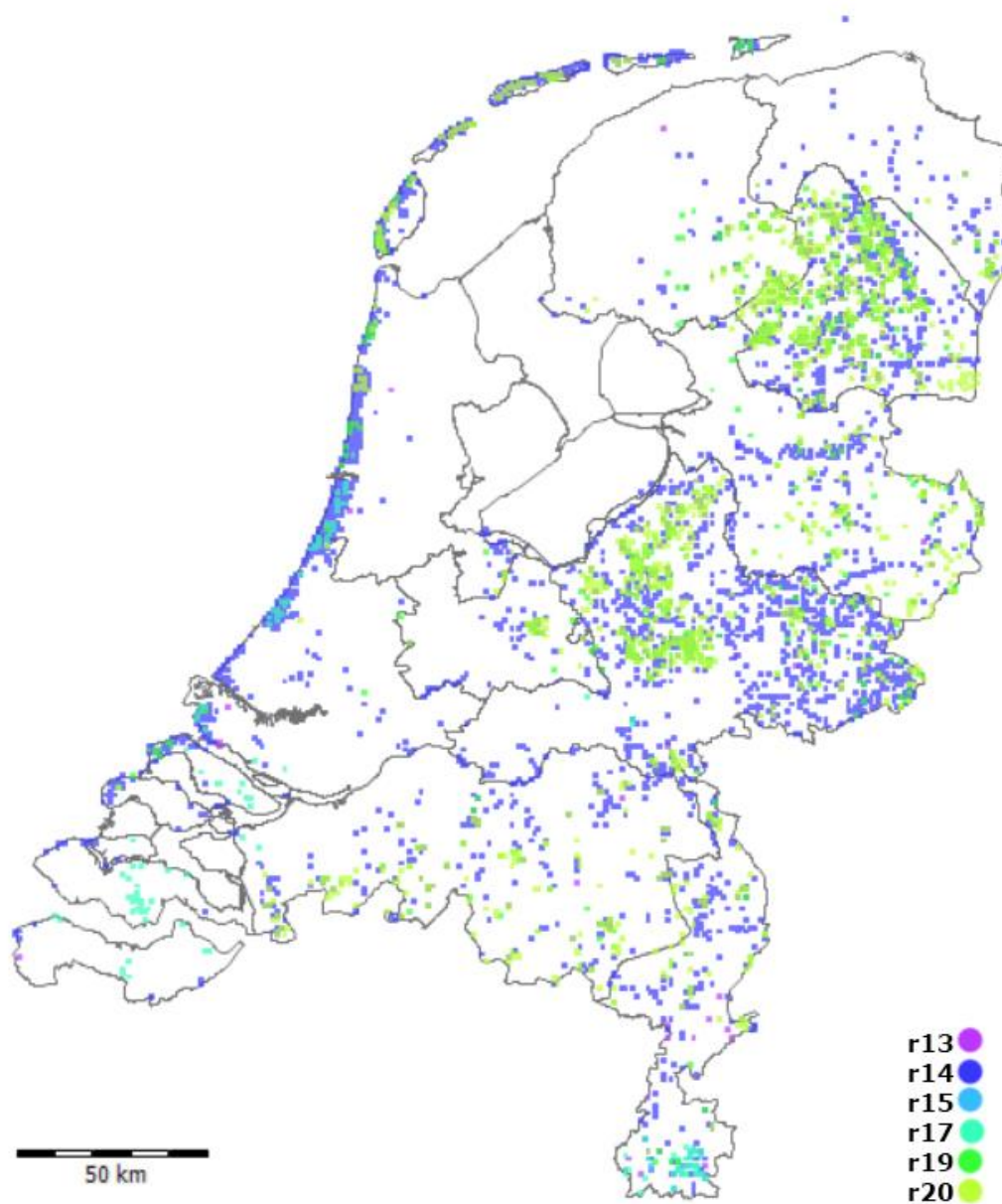
- Klasse van pioniergraslanden op gruis- en steenbodems (r13)
- Klasse van droge graslanden op zandgrond (r14)
- Klasse van kalkgraslanden (r15)
- Klasse van heischrale graslanden (r19)
- Klasse van droge heiden (r20)



**Figuur 19** (Lucht)temperatuuramplituden van de genoemde vegetatieklassen op basis van de Ellenberg indicatie (SynBioSys, 2021; Hennekens et al., 2010; Schaminée et al., 2007).

Ook het Marjolein-verbond (r17Aa), een zeldzame droge ruigtevegetatie met een relatief kleine temperatuuramplitude (Figuur 19), is mogelijk gevoelig voor een temperatuurstijging.

Binnen de vegetatieklasse van pioniergraslanden op gruis- en steenbodems (r13) zullen er naar verwachting geen grote veranderingen optreden. Met name de vetkruiden (*Crassulaceae*) zijn zeer goed bestand tegen grotere temperatuursextremen en droogte. Mogelijk dat een hogere bodemtemperatuur ertoe kan leiden dat de vegetatieontwikkeling binnen het kalkminnend of basifiel grasland op rotsbodems (H6110; Janssen et al. (2014)) wordt bemoeilijkt. Dit komt doordat de vestiging van kiemplanten van de karakteristieke soorten mogelijk afhankelijk is van waterbeschikbaarheid in de nazomer (Bakker et al., 2020). Aan de randen van dit zeldzame habitattypen, dat meest begrensd wordt door kalkgraslanden, is er het risico van vergroeiing door meer productieve kruiden of opslag van struweel. Daarnaast houdt een recente theorie rekening met het belang van cryoturbatie op rotsranden. Door vorstperioden wordt de toplaag van het mergelgesteente zachter, waardoor vestigings- en doorwortelingsmogelijkheden alsook de waterretentie versterkt worden.



**Figuur 20** Kilometerhokken met de betreffende vegetatieklassen in Nederland op basis van gegevens uit de Landelijke vegetatiedatabank (SynBioSys, 2021; Schaminée et al., 2006).

Ook in de klasse van de droge graslanden komen veel vegetatietypen voor die een bepaalde resistentie voor droogte hebben. Wederom geldt hier dat een stijging in de bodemtemperatuur kan leiden tot verdroging of juist een verruiging van de vegetatie bij voldoende vochtige omstandigheden. Veel associaties hebben daarbij een uitgesproken aanwezigheid van mossen en korstmossen. Met name korstmossen zijn gevoelig voor temperatuursverandering en worden mogelijk weggeconcentreerd door bladmossen, die tevens droogtegevoelig zijn (Paradis et al., 2016). De moslaag in deze graslanden functioneert daarbij als een buffer voor temperatuurextremen. Wanneer de moslaag verdwijnt, zal het effect van de luchttemperatuur een sterker effect hebben op de graslanden.

De klassen van de kalkgraslanden, een zeldzaam vegetatietype dat zich beperkt tot enkele hectaren in Zuid-Limburg, herbergen doorgaans iets productievere begroeiingen. Hoewel droogte wel degelijk een onderdeel is van de ecologie zal bodemtemperatuur relatief weinig effect hebben op de vegetatie.

De heischrale graslanden worden gekenmerkt door een vrij open vegetatie op zure bodems waar ook mossen prominent aanwezig kunnen zijn. Heischrale graslanden zijn zowel op vochtige (soms venige) bodems te vinden als op droge zandgronden. Voor de vochtige bodemtypen geldt wederom dat een stijging van de

---

bodemtemperatuur hier mogelijk minder impact heeft op de begroeiing, behalve dat de verdamping toeneemt. De combinatie van verdamping en verdroging kan wel zorgen voor een toename in de afbraak van organisch materiaal in de bodem wat leidt tot een enorme toename in de beschikbaarheid van voedingsstoffen die kunnen leiden tot een verruiging van het heischrale karakter van deze graslanden.

Wat betreft de droge heischrale graslanden spelen er andere factoren. Het open karakter verhoogt de kans op verdamping waardoor dit mogelijk een kwetsbaar vegetatietype is. Daarbij is ook de beperkte beschikbaarheid van voedingsstoffen een factor die bij verdere verdroging door een hogere bodemtemperatuur een rol kan gaan spelen. Echter is het mogelijk dat een hogere turnover van strooisel juist in deze begroeiingen kan bijdragen aan veranderingen. In eerste instantie zal dit leiden tot vergrassing van de vegetatie. Bij afwezigheid van concurrentiekrachtige kruiden, weinig snelgroeïende soorten en een aantal kruiden dat juist aangepast is aan open bodems, is er het risico dat de vergrassing de overhand krijgt, waardoor goede associaties ook mee door de atmosferische stikstofdepositie vervallen in vervilte derivaatgemeenschappen van het *Nardetea* en *Arrhenatheretea* of de Rompgemeenschap *Avenella flexuosa* (Bochtige smele).

Voor de droge heiden geldt min of met hetzelfde. Ook hier ligt bij een hogere bodemtemperatuur vergrassing op de loer.

Hoewel vochtigere bodems beter bestand zijn tegen bodemtemperatuurverschillen, zeker als deze in korte snelle veranderingen plaatsvinden, heeft een stijging van de bodemtemperatuur wel degelijk effect op de vegetatie. Met name in de veenbodems (in het laagveen district) kan een stijging tot indirecte effecten leiden. Vooral de verhoogde afbraak van organisch materiaal kan zorgen voor voedselrijkere omstandigheden (De Rooij et al., 2009), terwijl veel karakteristieke soorten gedijen bij een beperkt nutriëntenaanbod. Door verdroging – mede versneld door hogere temperaturen – verzuring en een hoge afbraak zal in een Veenmosrietland vergrassing optreden (SynBioSys, 2021).

## 4.7 Beheer hakhoutbossen Zuid-Limburg

Hoe gevoelig een vegetatie is voor temperatuursveranderingen, is voor een groot deel afhankelijk van het beheer. Soms is het beheer zelfs doorslaggevend. Een goed voorbeeld is de ondergroei van Zuid-Limburgse hellingbossen. Hoewel klimaatmodellen aangeven dat er sprake is van een toename van de (lucht)temperatuur, wijzen temperatuurindicatoren op een tegengestelde ontwikkeling. 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<sup>e</sup> eeuw werden veel hellingbossen nog actief gebruikt voor de oogst van hakhout, waarbij de boomkronen continu open werden gesnoeid. In de tweede helft van de 20<sup>e</sup> 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 hoog opgroeiende vegetatie als gevolg van een veranderd landgebruik 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), 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 (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 geremd door schadueffecten, in de winter kan het vasthouden van koude lucht of sneeuw zelfs zorgen voor verdere afkoeling. Waarschijnlijk spelen er in bossen meerdere *feedback loops* 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, waarbij hogere bodemtemperaturen zorgen voor een afname van pathogenen waardoor er meer zaailingoverleving plaatsvindt. Bij een bodemtemperatuurstijging door lichtinval kan dit op termijn leiden tot een sluiting van het boomdek (Reinhart et al., 2010).

---

## 4.8 Conclusies natuurontwikkeling

Op basis van het voorgaande literatuuronderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- 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 microklimaat ter plekke. Hoewel het macroklimaat in het algemeen warmer wordt, kunnen er op de schaal waarin planten reageren andere trends plaatsvinden.
- Waterbeschikbaarheid is de doorslaggevende *driver*, boven temperatuur, ook voor biodiversiteit. Wel is deze factor moeilijk los te zien van temperatuureffecten. De beschikbaarheid van vocht is bovenal limiterend voor de plantengroei. Verdamping wordt bevorderd door een hogere bodemtemperatuur, maar kan worden geremd door de bovengrondse vegetatie.
- Kiemings- en vestigingsbiologie wordt in beperkte mate beïnvloed door bodemtemperatuurstijging, overleving en ontwikkeling worden sterker beïnvloed.
- Een hogere bodemtemperatuur bevordert de afbraak van organisch materiaal (activiteit macrofauna, microfauna, schimmels en microbiom) en de beschikbaarheid van nutriënten.
- Stijging van de bodemtemperatuur remt de ondergrondse biomassa, maar stimuleert de bovengrondse productiviteit. Meer bovengrondse productiviteit bevoordeelt concurrentiekrachtige plantensoorten. Kruiden hebben uiteindelijk een voordeel ten opzichte van grassen, al zullen grassen als eerste positief reageren op een verhoogde omzetting van bodemorganisch materiaal.
- Een verminderde doorworteling verhoogt de kwetsbaarheid van planten voor verstoringen.
- Een hogere bodemtemperatuur zorgt tevens voor meer overleving van schadelijke macro- en microfauna en het microbiom.
- Er is in Nederland weinig onderzoek gedaan naar de invloed van bodemtemperatuur op de vegetatie. Op basis van buitenlands onderzoek zijn hypothesen gedaan voor de Nederlandse situatie.
- Hogere temperaturen kunnen de stofwisseling van de organismen versnellen en daarmee de bodemademhaling en C-emissies verhogen. Aanpassingen van micro-organismen aan opwarming kunnen klimaateffecten dempen. Verder kunnen er interacties ontstaan tussen temperatuur en droogte en tussen de planten en het bodemleven. Veranderingen in temperatuur is zelden de enige factor die verandert. Combinaties van factoren en mogelijke interacties beperken de voorspelbaarheid van effecten van opwarming op het bodemleven. Maar er worden wel significante effecten op bodemfuncties verwacht en ook gevonden.

---

## 5 Conclusie en vervolgonderzoek

Bodemtemperatuur wordt in Nederland maar op enkele plaatsen door het KNMI en (deels door WUR) langjarig gemeten. Die meetlocaties zijn ingericht als graslanden die regelmatig worden gemaaid. 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. Door de Nederlandse gegevens aan te vullen met experimenten en velddata uit het buitenland, zijn hypothesen opgesteld voor de ontwikkeling van de bodemtemperatuur in natuur- en agrarische gebieden. Ook over de invloed van de veranderende bodemtemperatuur op biotische en abiotische processen blijkt in Nederland relatief weinig onderzoek gedaan te zijn. Dit maakt dat we op basis van het literatuuronderzoek en trendanalyse slechts voor een aantal onderwerpen harde conclusies hebben kunnen trekken. Voor een deel van het onderzoek was dit onmogelijk en is op basis van literatuuronderzoek en ons oordeel als experts bepaald hoe processen zich ontwikkelen in tijd en ruimte. In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste aspecten weergegeven en is er een aanzet gegeven voor onderwerpen voor vervolgonderzoek.

### **Hoe heeft de bodemtemperatuur zich de afgelopen veertig jaar ontwikkeld?**

De bodemtemperatuur zoals gemeten op vijf verschillende dieptes (tussen 0,05-1,0 m -mv) op de vier KNMI-sites heeft een directe relatie met de gemeten luchttemperatuur op 1,5 m boven maaiveld. Voor drie van 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. Hier treedt een vorm van een natuurlijk hitte-eiland op. In bosgebieden wordt, door de beperkte instraling, verwacht dat de bodemtemperatuur juist minder sterk zal stijgen. Door het analyseren van andere meetstations (o.a. een tweetal WUR-metstations in Loobos en Veenkampen) kan het inzicht in de bodemtemperatuur in natuurgebieden worden verbeterd.

### **Is het mogelijk op basis van de historische trendanalyse voorspellingen te doen van de toekomstige bodemtemperatuur?**

De historische trendanalyses kunnen worden geëxtrapoleerd naar de toekomst, zolang de relaties lucht-bodem gelijk blijven en andere factoren (bv andere neerslagpatronen/hoeveelheden) niet dominant worden. Dit betekent dat op basis van KNMI-14-scenario's berekend kan worden hoe de bodemtemperatuur zich op de vier meetlocaties zal ontwikkelen. Een extrapolatie naar andere gebieden en vegetatietypes kan worden gemaakt met het agrohydrologische model SWAP. Dit model bleek in dit onderzoek in staat de historische bodemtemperatuur voor locatie De Bilt goed te kunnen simuleren. Een gebiedsdekkende bodemtemperatuurkaart zal vanwege de diversiteit in vegetatie en de invloed van zeer lokale omstandigheden (microklimaat) weinig extra inzicht opleveren.

### **Is het te verwachten dat de bodemtemperatuur sneller gaat stijgen dan de luchttemperatuur?**

In arctische gebieden is te zien dat een verhoging van luchttemperatuur leidt tot het smelten van de permafrost waardoor de opwarming van de bodem wordt versneld. Voor de Nederlandse situatie wordt een dergelijk tipping-point niet verwacht. Wel kan door het aanpassen van de vegetatie of andere groundbewerking, de bodemtemperatuur sneller gaan stijgen dan de luchttemperatuur. Dit fenomeen zien we op dit moment in steden waar veel warmte wordt vastgehouden en de bodemtemperatuur sterk is gestegen. Door de sterke stijging van de bodemtemperatuur is de bodem minder in staat de extra warmte op te nemen, waardoor de luchttemperatuur nog verder stijgt. Dit hitte-eilandeffect zou kunnen optreden in droge natuurgebieden met beperkte vegetatie met een sterk uitdrogende bodem. In een aantal gevallen kan het creëren van dergelijke omstandigheden gunstig zijn voor de ontwikkeling van bepaalde vegetatietypes.



---

### **Is de bodemtemperatuur een goede indicator voor de opwarming van de aarde?**

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.

### **Wat is de invloed van bodemtemperatuur op de diverse bodemprocessen?**

De bodemtemperatuur is een van de factoren die meespeelt in bodemprocessen, zoals mineralisatie, veenoxidatie en denitrificatie. In zijn algemeenheid geldt dat een stijging van de bodemtemperatuur tot een versnelling van bodemprocessen leidt. De mate waarin is echter niet eenduidig.

In de meeste gevallen wordt in simulatiemodellen een  $Q_{10}$ -, Arrhenius- of exponentiële relatie verondersteld, waarbij de processnelheid toeneemt bij een toenemende temperatuur. Vaak wordt een  $Q_{10}$  van 2 tot 3 gebruikt: elke 10°C stijging van de temperatuur leidt tot een verdubbeling of verdrievoudiging van het proces. De reden dat geen eenduidige relaties worden gebruikt, ligt mogelijk in het feit dat de genoemde processen afhankelijk zijn van diverse factoren (o.a. vochtgehalte, pH, beschikbaarheid energiebron), waar temperatuur er een van is. Het is dan ook niet altijd eenvoudig om alleen het temperatuureffect te isoleren en kwantificeren. De temperatuurafhankelijke relaties die voor de diverse processen gebruikt worden, lopen boven de 20°C sterk uiteen.

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. Onder droge omstandigheden neemt de snelheid van de bodemprocessen af. Als gelijktijdig de bodemtemperatuur toeneemt, dan nemen deze bodemprocessen toe. Wat het netto-effect zal zijn, hangt af van de specifieke af- en toename op basis van vocht en temperatuur. Dit betekent dat beide factoren van belang zijn bij het doen van voorspellingen naar veranderingen van bodemprocessen.

### **Is de bodemtemperatuur belangrijk bij het berekenen van de vochthuishouding?**

Er bestaat een duidelijke interactie tussen bodemvochtgehalte en bodemtemperatuur. De invloed van bodemvochtgehalte op de warmte-eigenschappen is eenvoudig te hanteren. Omgekeerd geldt ook dat watertransport beïnvloed wordt door bodemtemperatuur. Het is minder aannemelijk dat dit gaat via vloeistoftransport onder invloed van temperatuurgradiënten (hoewel soms toch zo toegepast). Het is wel duidelijk dat temperatuur van invloed is op met name de doorlatendheid (zowel voor water als ook voor waterdamp) via de temperatuurafhankelijkheid van de eigenschappen van water. Met name de verandering van viscositeit met temperatuur is sterk (25% verlaging van 10 naar 20°C) en zou in agrohydrologische modellering moeten worden meegenomen.

### **Gaan de seizoenpatronen en de extremen in bodemtemperatuur veranderen?**

In dit onderzoek is gekeken naar de gemiddelde stijging van de bodemtemperatuur en niet naar het voorkomen van meer extreme kortdurende stijgingen of het eerder optreden van een bepaalde temperatuur. Deze situaties kunnen interessant zijn vanwege het eerder kiemen van zaden in het voorjaar. Ook is bekend dat bepaalde vegetaties (eenjarigen en pioniersoorten) een bepaalde minimale bodemtemperatuur (koude-shock) nodig hebben om te kiemen. Nader onderzoek moet duidelijk maken of er een snellere opwarming van de bodem in het voorjaar zichtbaar is en hoe die zich de komende jaren kan ontwikkelen.

### **In hoeverre zijn de gevolgen van toekomstige bodemtemperatuurveranderingen nu al zichtbaar?**

De bodemtemperatuur is de afgelopen veertig jaar ca. 1,5°C gestegen en zal de komende decennia naar alle waarschijnlijkheid nog enkele graden stijgen. Deze verschuiving op macroschaal kan ertoe leiden dat bepaalde soorten gaan verdwijnen of zich juist beter ontwikkelen. Plantengroei wordt echter lokaal sterk beïnvloed door het aanwezige microklimaat. De lokale variatie in temperatuur en vocht is belangrijker dan het macroklimaat. Door nu al gericht te kijken naar zeer lokale omstandigheden kan een beeld worden verkregen wat de invloed is van een meer generiekere verhoging van de bodemtemperatuur in de toekomst.

### **Hoe belangrijk is de stijging van de bodemtemperatuur voor de ontwikkeling van vegetatie?**

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.



---

Waterbeschikbaarheid is de doorslaggevende driver, boven temperatuur. Kiemings- en vestigingsbiologie wordt in beperkte mate beïnvloed door bodemtemperatuurstijging; overleving en ontwikkeling wordt sterker beïnvloed. Hierdoor is het mogelijk dat er een verschuiving van vegetatietypes gaat plaatsvinden. Dit geldt met name voor meerjarige vegetatie, die minder kans heeft dan zich sterk ontwikkelde vroeg kiemende eenjarigen.

Daarnaast kan het aantal plantensoorten worden beïnvloed door veranderingen in de bodemtemperatuur. Zeker in vegetaties die duidelijk seizoenale karakteristieken hebben, bijvoorbeeld in de kweldergemeenschappen, zijn deze effecten goed te meten.

### **Hoe belangrijk is de stijging van de bodemtemperatuur voor de ontwikkeling van het bodemleven?**

Hogere bodemtemperaturen kunnen de stofwisseling van de organismen versnellen en daarmee de bodemademhaling en C-emissies verhogen. Aanpassingen van micro-organismen aan opwarming kunnen klimaateffecten dempen. Verder kunnen er interacties ontstaan tussen temperatuur en droogte en tussen de planten en het bodemleven. Verandering in temperatuur is zelden de enige factor die verandert. Combinaties van factoren en mogelijke interacties beperken de voorspelbaarheid van effecten van opwarming op het bodemleven. Maar er worden wel significante effecten op bodemfuncties verwacht en ook gevonden.

Hogere temperaturen versterken droogte in de zomer door verhoging van de verdamping door de vegetatie. Droogte kan de fysiologie en structuur van de microbiële gemeenschap veranderen, waardoor de omzettingen van organische stof en bodemfuncties worden beïnvloed. Veranderingen in bepaalde groepen bodemdieren, zoals regenwormen, werken waarschijnlijk via cascade-effecten door naar andere groepen organismen in de bodem en het functioneren van ecosystemen.

### **Biedt een verhoogde bodemtemperatuur nieuwe kansen voor natuurontwikkeling?**

Bij een verhoogde bodemtemperatuur zal het groeiseizoen langer zijn, waardoor er meer bovengrondse biomassa wordt gevormd. Het is mogelijk dat dit ook voor vegetatie in Nederland het geval zal zijn en dat de bovengrondse productiviteit stijgt. Dit kan over het algemeen leiden tot verruiging of vergrassing in meer open vegetatietypen en graslanden. Hierbij is het mogelijk dat toch al productieve soorten hierbij een voordeel hebben boven soorten die trager of minder groeien. In sommige gevallen zou dat kunnen betekenen dat toch al concurrentiekrachtige plantensoorten de kleinere soorten overwoekeren en wegconcurreren.

Een verhoging van de bodemtemperatuur zal in het algemeen leiden tot drogere omstandigheden. Met name de soorten die relatief oppervlakkig wortelen, zullen gevoelig zijn voor temperatuursverhogingen. Denk hierbij aan pionierssituaties en de al droge (kruidenrijke) graslanden. In vegetaties met dieper wortelende soorten zal een temperatuurstijging van de bodem relatief weinig effect hebben op de doorworteling. Bovendien worden diep wortelende vegetaties over het algemeen gekarakteriseerd door hoog opgaande en zeer bedekkende begroeiing (bossen, ruigten, zomen en struwelen). Deze bovengrondse begroeiing heeft ook een direct bufferend effect op de bodemtemperatuur door het belemmeren van instraling van zonne-energie.

Het antwoord op deze vraag wordt deels bepaald door de definitie van 'ontwikkeling'. Is dit vanuit het behoud van het huidige en het zien van verandering als bedreiging of is dit vanuit een adaptieve gedachte waarin de natuur die zich ontwikkelt naar nieuwe omstandigheden?

### **Moet de verandering van bodemtemperatuur een grotere rol krijgen in onderzoek naar klimaatverandering?**

Tijdens het onderzoek is duidelijk geworden dat bekend is dat bodemtemperatuur een invloed heeft op de diverse biotische en abiotische processen. De mate waarin en hoe deze gaat wijzigen onder invloed van klimaatwijzigingen is niet onderzocht. Zeker wanneer het betrekking heeft op de invloed van bodemtemperatuurverandering op de ontwikkeling van natuurgebieden en de agrarische productie. Dit pleit voor meer bewustwording en hopelijk gaat dit onderzoek daaraan bijdragen, het meenemen van bodemtemperatuur in de modelleringen van de diverse bodemprocessen en het meten van bodemtemperatuur op meerdere sites onder verschillende omstandigheden (bodem en vegetatie). Ten slotte

---

is het belangrijk om verder te onderzoeken wat de invloed is van bodemtemperatuur voor specifieke gebieden en hoe die mogelijk leidt tot ander beheer en onderhoud.

### **Welk aanvullend onderzoek kan de kennis over invloed van bodemtemperatuurstijging op de natuurontwikkeling vergroten?**

Dit onderzoek was een eerste aanzet 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. De belangrijkste vervolgvragen liggen bij het voorspellen van de bodemtemperatuur in de toekomst, de effecten van seizoenale veranderingen (verschuivingen) 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 enkele KNMI-sites met grasland. 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 het voorkomen van meer extreme kortdurende stijgingen of het 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 vegetaties (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.
- Op basis van tijdreeksanalyse en toekomstscenario's (KNMI '14 klimaatscenario's) kan een beeld van de verandering van de bodemtemperatuur van de meetlocaties worden geschetst met behulp van het in dit onderzoek ontwikkelde tijdreeksmodel. Aanvullend kan met het agrohydrologische model SWAP de bodemtemperatuur berekend worden voor andere vegetaties en omstandigheden, zoals drogere/minder vegetatie of juist meer beschut (bossen). Op basis van het tijdreeksmodel en de SWAP-berekeningen kan ook gekeken worden of er een continentale of zonale gradiënt te vinden is in de meetdata.
- Om de gevolgen van de opwarming van de bodem zoals geschetst in het literatuuronderzoek en voorspeld voor enkele (KNMI-)locaties verder te concretiseren, zal een aantal specifieke cases moeten worden onderzocht. Cases waarbij opwarming een positief effect op de natuurwaarde kan hebben (duingraslanden), cases waar opwarming juist een negatief effect kan hebben (ofwel de graslanden op veen of heide of schrale graslanden) en cases waar opwarming eigenlijk geen rol speelt, hoewel modellen dit wel aangeven (eiken-(haag)beukenbossen). Dit moet helpen klimaatadaptieve inrichtings- en beheersmaatregelen te nemen.

---

# Literatuur

- Allison, S.D., Treseder, K.K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils (2008) *Global Change Biology*, 14 (12), pp. 2898-2909.
- Assinck, F.B.T. and C. Rappoldt. 2006. MOTOR 2.0: Module for transformation of organic matter and nutrients in soil. Alterra-report 933, Alterra, Wageningen, The Netherlands.
- Bai, E., S. Li, W. Xu, W. Li, W. Dai, P. Jiang. 2013. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics. *New Phytologist* 199: 441-451, doi:10.1111/nph.12252.
- Bai, R. Y. Lai, M. Zhang, J. Ren. 2020. Study on the coupled heat-water-vapor-mechanics process of unsaturated soils. *Journal of Hydrology* 585: 124784. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124784>
- Bardgett RD, Manning P, Morrien E, De Vries FT (2013) Hierarchical responses of plant-soil interactions to climate change: consequences for the global carbon cycle. *J Ecol* 101:334–343.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam, and R. Aerts, 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *J. Hydrol.*, 360, 147-165.
- 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.
- Box, G.E.P., G.M. Jenkins, G.C. Reinsel en G.M. Ljung, 2016. *Time series analysis. Forecasting and Control*. Fifth Edition. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- Bradbury, N.J., A.P. Whitmore, P.B.S. Hart and D.S. Jenkinson. 1993. Modelling the fate of nitrogen in crop and soil in the years following application of 15N-labelled fertilizer to winter wheat. *Journal of Agricultural Science* 121: 363-379.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.
- Brooker, R., & van der Wal, R. (2003). Can soil temperature direct the composition of high arctic plant communities?. *Journal of Vegetation Science*, 14(4), 535-542.
- 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.
- Castro HF, Classen AT, Austin EE, Norby RJ, Christopher WS (2010) Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers. *Appl Environ Microbiol* 76:999–1007.
- Chatskikh, D., J.E. Olesen, J. Berntsen, K. Regina and S. Yamulki. 2005. Simulation of effects of soils, climate and management on N2O emission from grasslands. *Biogeochemistry* 76: 395–419.
- Childs, D. Z., Metcalf, C. J. E., & Rees, M. (2010). Evolutionary bet-hedging in the real world: empirical evidence and challenges revealed by plants. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1697), 3055-3064.
- Choler, P. (2018). Winter soil temperature dependence of alpine plant distribution: Implications for anticipating vegetation changes under a warming climate. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 30, 6-15.
- Coleman, K. & D.S. Jenkinson. 2014. RothC - A model for the turnover of carbon in soil. Model description and users guide. Rothamsted Research Harpenden Herts, AL5 2JQ, UK
- Constantz, J. 1982. Temperature Dependence of Unsaturated Hydraulic Conductivity of Two Soils. *Soil Science Society of America Journal* 46: 466-470.
- Dantas, B. F., Moura, M. S., Pelacani, C. R., Angelotti, F., Taura, T. A., Oliveira, G. M., ... & Seal, C. E. (2020). Rainfall, not soil temperature, will limit the seed germination of dry forest species with climate change. *Oecologia*, 192(2), 529-541.
- De Vries, D.A. 1963. The thermal properties of soils. *In*: R.W. van Wijk (ed.), *Physics of plant environment*, pp. 210-235, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Duistermaat, L. (2020) Heukel's Flora van Nederland, Noordhoff/Naturlis Biodiversity Center
- Farnsworth, E. J., Nunez-Farfan, J., Careaga, S. A., & Bazzaz, F. A. (1995). Phenology and growth of three temperate forest life forms in response to artificial soil warming. *Journal of Ecology*, 967-977.

- 
- Fernández-Pascual, E., Jiménez-Alfaro, B., Hájek, M., Díaz, T. E., & Pritchard, H. W. (2015). Soil thermal buffer and regeneration niche may favour calcareous fen resilience to climate change. *Folia Geobotanica*, 50(4), 293-301.
- Garnier, P., Néel, C., Mary, B., and Lafolie, F. (2001). Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. *European Journal of Soil Science* 52: 253–268.
- Godwin D.C. and Jones C.A. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. *In* Modeling Plant and Soil Systems (J. Hanks and J.T. Ritchie, Eds.), p. 287-321. Agronomy monograph no. 31. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wi.
- Godwin D.C. and Singh U. 1998. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. *In*: Understanding Options for Agricultural Production (G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P.K. Thornton, Eds.), p. 55-77. System Approaches for Sustainable Agricultural Development. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London.
- Groenendijk, P., H. Boogaard, M. Heinen, J. Kroes, I. Supit, A. de Wit, 2017. Simulation of nitrogen-limited crop growth with SWAP-WOFOST. Process descriptions and user manual. Report 2721, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/400458>; see also: [swap.wur.nl](http://swap.wur.nl)
- Groenendijk, P., L.V. Renaud and J. Roelsma, 2005. Prediction of Nitrogen and Phosphorus leaching to groundwater and surface waters. Process descriptions of the ANIMO 4.0 model. Alterra–Report 983, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/35121>
- Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen, H. Svendsen. 1990. DAISY – Soil Plant Atmosphere System Model. Report A10, The Royal Veterinary And Agricultural University, Miljøstyrelsen, Copenhagen, Denmark.
- Haugwitz, M.S., Bergmark, L., Priemé, A., Christensen, S., Beier, C., Michelsen, A.. Soil microorganisms respond to five years of climate change manipulations and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> in a temperate heath ecosystem (2014) *Plant and Soil*, 374 (1-2), pp. 211-222.
- Hénault, C. and J.C. Germon. 2000. NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *European Journal of Soil Science* 51: 257-270.
- Hendriks, R. 1991. Afbraak en mineralisatie van veen. Literatuuronderzoek. Rapport 199, DLO-Staring Centrum, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/304337>
- Hennekens, S. M., Smits, N. A. C., & Schaminée, J. H. J. (2010). SynBioSys Nederland versie 2. Alterra, Wageningen.
- Hipel, K.W. and A.I. McLeod, 1994. *Time series modelling of water resources and environmental systems*. Elsevier, Amsterdam.
- IF Technology, 2012. Meer met bodemenergie, autonome opwarming ondergrond. <https://soilpedia.nl/Bikiviki%20documenten/Meer%20met%20Bodemenergie/Rapport%208%20Autonomie%20opwarming%20bodem%20Meer%20met%20Bodemenergie.pdf>
- IPCC (2007) Climate change 2007 synthesis report. An assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva
- Janssen, J. A. M., Weeda, E. J., Schipper, P., Bijlsma, R. J., Schaminée, J. H. J., Deerenberg, C. & Jak, R. (2014). Habitattypen in Natura 2000-gebieden. Beoordeling van oppervlakte representativiteit en behoudsstatus in de Standard Data Forms (SDFs)
- Johnsson, H., Bergström, L., and Jansson, P.E. (1987). Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 18: 333–356.
- Kaspar, T. C., & Bland, W. L. (1992). Soil temperature and root growth. *Soil Science*, 154(4), 290-299
- Kersebaum, K.C. 1995. Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling* 81: 145-156.
- Kirschbaum, M.U.F. 2004. Direct and indirect climate change effects on photosynthesis and transpiration. *Plant Biology* 6(3): 242-253.
- KNMI. Actuele bodemtemperatuurmetingen <https://knmi.nl/nederland-nu/weer/actueel-weer/actuele-bodemtemperaturen>.
- Kooi, 2008. Spatial variability in subsurface warming over the last three decades; insight from repeated borehole temperature measurements in The Netherlands. VU, Amsterdam
- Koorevaar, P., G. Menelik and C. Dirksen. 1983. *Elements of Soil Physics*. Development in Soil Science 13, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- 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>; see also: [swap.wur.nl](http://swap.wur.nl)
- 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>; see also: [swap.wur.nl](http://swap.wur.nl)
- Kudo, G., & Cooper, E. J. (2019). When spring ephemerals fail to meet pollinators: mechanism of phenological mismatch and its impact on plant reproduction. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1904), 20190573.
- Lozano-Parra, J., Pulido, M., Lozano-Fondón, C., & Schnabel, S. (2018). How do soil moisture and vegetation covers influence soil temperature in drylands of Mediterranean regions?. *Water*, 10(12), 1747.
- Li, C., Frolking, S., and Frolking, T.A. (1992). A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research* 97: 9759–9776.
- Natali, S. M., Schuur, E. A., & Rubin, R. L. (2012). Increased plant productivity in Alaskan tundra as a result of experimental warming of soil and permafrost. *Journal of ecology*, 100(2), 488-498.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2011) Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report Nr. 406. College Station, TX. Available from: <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf> (accessed December 23, 2019).
- Nijssen, M., Bouwman, J., & Siepel, H. (2014). Hoe zijn negatieve effecten van stikstofdepositie op diersoorten te mitigeren? *De Levende Natuur*, 115, 167-171.
- Nordell, 2008. It's is all about thermal energy storage. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1012140/FULLTEXT01.pdf>
- O'Connell, J. L., Alber, M., & Pennings, S. C. (2019). Microspatial differences in soil temperature cause phenology change on par with long-term climate warming in salt marshes. *Ecosystems*, 1-13.
- Oliver, S. A., Oliver, H. R., Wallace, J. S., & Roberts, A. M. (1987). Soil heat flux and temperature variation with vegetation, soil type and climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39(2-3), 257-269.
- Ooi, M. K. J., Auld, T. D., & Denham, A. J. (2011). Projected soil temperature increase and seed dormancy response along an altitudinal gradient: implications for seed bank persistence under climate change. *Plant and Soil*, 353(1-2), 289–303.
- Ooi, M. K., Auld, T. D., & Denham, A. J. (2009). Climate change and bet-hedging: interactions between increased soil temperatures and seed bank persistence. *Global Change Biology*, 15(10), 2375-2386.
- Ooi, M. K., Auld, T. D., & Denham, A. J. (2012). Projected soil temperature increase and seed dormancy response along an altitudinal gradient: implications for seed bank persistence under climate change. *Plant and Soil*, 353(1), 289-303.
- Ozinga, W. A., Bekker, R. M., Schaminee, J. H., & Van Groenendael, J. M. (2004). Dispersal potential in plant communities depends on environmental conditions. *Journal of Ecology*, 92(5), 767-777.
- Paradis, M., Lévesque, E., & Boudreau, S. (2016). Greater effect of increasing shrub height on winter versus summer soil temperature. *Environmental Research Letters*, 11(8), 085005.
- Park, S., Seo, Y.S. & Hegeman, A.D. Plant metabolomics for plant chemical responses to belowground community change by climate change. *J. Plant Biol.* **57**, 137–149 (2014).
- Peters, A. 2013. Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research* 49: 6765–6780. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/wrcr.20548>
- Petersen, B.M., J. Berntsen, S. Hansen, L.S. Jensen. 2005. CN-SIM—a model for the turnover of soil organic matter. I. Long-term carbon and radiocarbon development. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 359–374.
- Philip, J.R. and D.A. de Vries, 1957. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Amer. Geophys. Union* 38: 222-231. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/TR038i002p00222>
- Phillips, H.R.P., et al. Global distribution of earthworm diversity (2019) *Science*, 366 (6464), pp. 480-485.
- Price, J. C. (1979). Assessment of the urban heat island effect through the use of satellite data. *Monthly Weather Review*, 107(11), 1554-1557.
- Rahn, C.R., Zhang, K., Lillywhite, R. et al. (2007) Brief Description of the EU-ROTATE\_N Model. The Integrated Model – Description of the Model Subroutines. University of Warwick. Available from: <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/lifesci/wcc/research/nutrition/eurotaten> (accessed December 23, 2019).

- Rahn, C.R., Zhang, K., Lillywhite, R. et al. (2010). EU-Rotate\_N – a decision support system – to predict environmental and economic consequences of the management of nitrogen fertiliser in crop rotations. *European Journal of Horticultural Science* 75: 20–32.
- 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.
- Renaud, L.V., J. Roelsma, P. Groenendijk. 2005. ANIMO 4.0. User's guide of the ANIMO 4.0 leaching model. Alterra-Report 224, Alterra, Wageningen.  
<http://www2.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/Alterrapporten/AlterraRapport224.pdf>
- Robinson, S. I., McLaughlin, Ó. B., Marteinsdóttir, B., & O’Gorman, E. J. (2018). Soil temperature effects on the structure and diversity of plant and invertebrate communities in a natural warming experiment. *Journal of Animal Ecology*, 87(3), 634-646.
- Saito, H., J. Šimůnek, & B.P. Mohanty. 2006. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 784–800. <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0007>
- Salo, T. J., Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Angulo, C., Ewert, F., . . . Rötter, R. P. (2016). Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization. *Journal of Agricultural Science*, 154(7), 1218-1240. doi:10.1017/S0021859615001124
- Schaminée, J. H. J., Janssen, J. A. M., Haveman, R., Hennekens, S. M., Heuvelink, G. B. M., Huiskes, H. P. J., & Weeda, E. J. (2006). Schatten voor de natuur: achtergronden, inventaris en toepassingen van de Landelijke Vegetatie Databank. Alterra.
- Schaminée, J. H., Hennekens, S. M., & Ozinga, W. A. (2007). Use of the ecological information system SynBioSys for the analysis of large datasets. *Journal of Vegetation Science*, 18(4), 463-470.
- Shao, P., He, H., Zhang, X., Xie, H., Bao, X., Liang, C. Responses of microbial residues to simulated climate change in a semiarid grassland (2018) *Science of the Total Environment*, 644, pp. 1286-1291.
- Sharpley, A.N., and J.R. Williams (eds.). 1990. EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768.
- Sierra, J. and L. Marban. 2000. Nitrogen Mineralization Pattern of an Oxisol of Guadeloupe, French West Indies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2002–2010.
- Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. Th. van Genuchten. 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 4.08. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California.
- Singh BK, Bardgett RD, Smith P, Reay DS (2010) Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options. *Nature Reviews Microbiology* 8:779–790.
- 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.
- Stockle, C.O., G.S. Campbell. 1989. Simulation of Crop Response to Water and Nitrogen: An Example Using Spring Wheat. *Trans ASAE* 32(1): 66-74.
- Sünnemann, M., Alt, C., Kostin, J.E., Lochner, A., Reitz, T., Siebert, J., Schädler, M., Eisenhauer, N. Low-intensity land-use enhances soil microbial activity, biomass and fungal-to-bacterial ratio in current and future climates (2021a) *Journal of Applied Ecology*, 58 (11), pp. 2614-2625.
- Sünnemann, M., Siebert, J., Reitz, T., Schädler, M., Yin, R., Eisenhauer, N. Combined effects of land-use type and climate change on soil microbial activity and invertebrate decomposer activity (2021b) *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 318, art. no. 107490.
- SynBioSys (2021) [www.synbiosys.alterra.nl/synbiosysnl](http://www.synbiosys.alterra.nl/synbiosysnl)
- Ten Berge, H.F.M. 1986. Heat and water transfer at the bare soil surface. Aspects affecting thermal imagery. PhD Thesis, Landbouwhogeschool, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/166817>
- Van den Akker, J.J.H., J. Beuving, R.F.A. Hendriks & R.J. Wolleswinkel. 2007. Maaiveldvaling, afbraak en CO<sub>2</sub>-emissie van Nederlandse veenweidegebieden. *Leidraad Bodembescherming*, afl. 83, 5510: 1-30, SDU Uitgevers, Den Haag.
- Van der Burgt, G.J.H.M., Oomen, G.J.M., Habets, A.S.J., and Rossing, W.A.H. (2006). The NDICEA model, a tool to improve nitrogen use efficiency in cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74: 275–294.
- van Rooij, S. A. M., Steingröver, E. G., Witte, F., & Goosen, H. (2009). Klimaatscan Natura 2000 gebieden. KWR.

- 
- Vermeulen, J. & R.F.A. Hendriks. 1996. Bepaling van afbraaksnelheden van organische stof in laagveen. Ademhalingsmetingen aan ongestoorde veenmonsters in het laboratorium. Rapport 288, DLO-Staring Centrum, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/303325>
- Wang, P., Heijmans, M. M., Mommer, L., van Ruijven, J., Maximov, T. C., & Berendse, F. (2016). Belowground plant biomass allocation in tundra ecosystems and its relationship with temperature. *Environmental Research Letters*, 11(5), 055003.
- Warner, E., Marteinsdóttir, B., Helmutsdóttir, V. F., Ehrlén, J., Robinson, S. I., & O’Gorman, E. J. (2021). Impacts of soil temperature, phenology and plant community composition on invertebrate herbivory in a natural warming experiment. *Oikos*.
- 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.
- Wilson, S. D., & Tilman, D. (1993). Plant competition and resource availability in response to disturbance and fertilization. *Ecology*, 74(2), 599-611
- Xiao, B., Wang, H., Fan, J., Fischer, T., & Veste, M. (2013). Biological soil crusts decrease soil temperature in summer and increase soil temperature in winter in semiarid environment. *Ecological engineering*, 58, 52-56.
- Yang, H.S. 1996. Modelling organic matter mineralization and exploring options for organic matter management in arable farming in northern China. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.

---

# Bijlage 1 Transfer-ruismodellering (TFN) maandgemiddelde temperaturen

## B1.1 Aanpak

Het doel van de TFN-modellering is om de volgende onderzoeksvragen te beantwoorden:

- Hoe hangt de bodemtemperatuur op verschillende dieptes samen met luchttemperatuur?
- Is er een samenhang tussen bodemtemperatuur en neerslagsom?

We beperken ons tot *lineaire* samenhang. Volgens het iteratieve proces van identificatie, kalibratie (*fitting*) en verificatie (*diagnostic checking*), i.e. de Box-Jenkinsprocedure (Box et al., 2016; Hipel en McLeod, 1994), zijn TFN-modellen voor de lineaire relatie tussen bodem- en luchttemperatuur opgesteld.

Identificatie vond plaats op grond van auto-correlatiefuncties, partiële auto-correlatiefuncties en kruiscorrelatiefuncties. Alle reeksen zijn voorafgaand aan de analyses gecorrigeerd voor hun gemiddelde om aanloopfouten te minimaliseren. Kalibratie gebeurde met de maximum-likelihood-methode, waarbij de iteraties werden gecontroleerd met de Nelder-Meadmethode. Verificatie vond plaats op grond van de residuele auto-correlatiefunctie en de kruiscorrelatiefuncties voor residuen en invoerreeks(en).

Het bleek dat de seizoenstructuur van de bodemtemperaturen niet geheel kon worden verklaard uit luchttemperatuur en neerslagsom. Ook de relatie met globale straling is onderzocht, maar deze bleek van zeer geringe invloed op de dynamische structuur van bodemtemperaturen. Het deel van de seizoenstructuur dat niet uit luchttemperatuur of neerslagsom kon worden verklaard, is in het ruismodel beschreven met een seizoencomponent.

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):

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



## B1.2 Resultaten

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

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

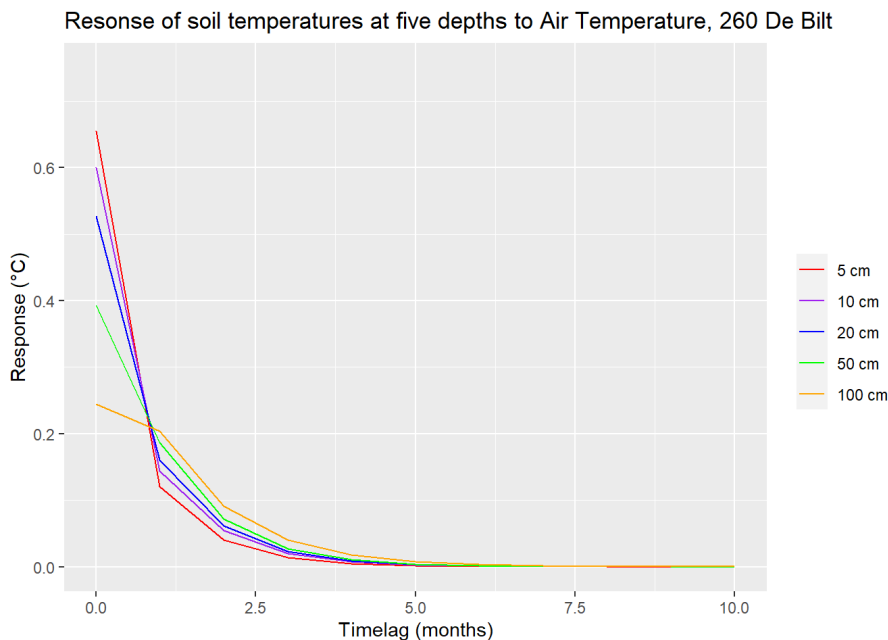
Dit model bevat geen interceptparameter  $c$ , vanwege de seizoendifferentiatie. In de volgende subparagrafen volgen de resultaten van de TFN-modellering voor de bodemtemperaturen bij de vier KNMI-stations.

### B1.2.1 Gemiddelde maandtemperaturen De Bilt 260

Tabel 4 geeft de parameterwaarden van de TFN-modellen voor de relatie tussen bodem- en luchttemperatuur. De waarde van de autoregressieve parameter van de transfercomponent,  $\hat{\delta}_1$ , neemt toe met de diepte, terwijl de waarde van de *moving average* parameter bij lag 0,  $\hat{\omega}_0$ , afneemt. Naarmate de diepte toeneemt, leidt een verandering in luchttemperatuur tot minder verandering in bodemtemperatuur, maar werkt deze verandering langer door. De impuls-responsfuncties in Figuur 21 laten dit zien.

**Tabel 4** TFN-modellen voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 260 De Bilt.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur		Ruiscomponent				
	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.3374	0.6554	-0.1009	0.6304	-0.2547	0.0157	-0.1009
10	0.3753	0.6002	-0.0815	0.3227	-0.0219	0.2634	-0.8121
20	0.3814	0.5272	-0.0406	0.3563	-0.0415	0.2536	-0.7943
50	0.3828	0.3926	0.0366	0.6310	-0.2682	0.1794	-0.7894
100	0.4463	0.2445	0.0951	0.6115	-0.2238	0.1594	-0.8297



**Figuur 21** Impuls-responsfuncties voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 260 De Bilt.

Figuur 21 is als volgt te interpreteren: stel je voor dat bodem- en luchttemperatuur in evenwicht en constant is. Nu is de luchttemperatuur gedurende één maand één graad hoger, om vervolgens weer terug te gaan

naar het oorspronkelijke niveau. De grafiek laat zien hoe de bodemtemperatuur hierop reageert: op 5 cm stijgt de bodemtemperatuur met iets meer dan 0,6°C en daalt binnen vijf maanden naar het oorspronkelijke niveau. Op 100 cm stijgt de bodemtemperatuur met iets meer dan 0,2°C en daalt binnen iets meer dan vijf maanden terug naar het oorspronkelijke niveau. De grafiek laat zien de invloed van luchttemperatuur op bodemtemperatuur afneemt met de diepte, maar langer doorwerkt.

Tabel 5 geeft de gekalibreerde parameterwaarden voor de TFN-modellen die zowel luchttemperatuur als neerslagsom als invoer hebben. Merk op dat de omega-parameters in de component voor neerslagsom heel klein zijn. Dat betekent dat neerslagsom maar een heel klein beetje bijdraagt aan bodemtemperatuur.

**Tabel 5** TFN-modellen met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer en bodemtemperatuur als uitvoer, KNMI-station 260 De Bilt.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur		Neerslagsom			Ruiscomponent			
	delta_1	omega_0	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.1887	0.6557	0.7097	0.0005	0.0021	0.3029	0.0308	0.2686	-0.8255
10	0.2425	0.5968	0.6419	0.0008	0.0019	0.2811	0.0064	0.2885	-0.8108
20	0.3030	0.5256	0.5335	0.0013	0.0021	0.3039	-0.0043	0.2923	-0.7902
50	0.4491	0.3983	0.5162	0.0013	0.0023	0.5851	-0.2447	0.2202	-0.7926
100	0.6475	0.2578	0.5692	0.0008	0.0016	0.5566	-0.2545	0.1680	-0.8372

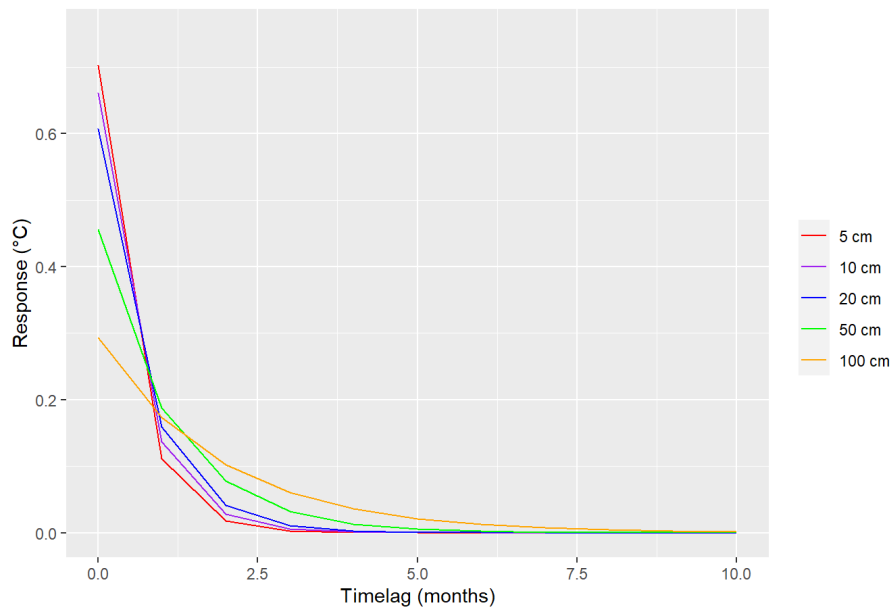
### B1.2.2 Gemiddelde maandtemperaturen Marknesse 273

Tabel 6 geeft de gekalibreerde parameterwaarden van de TFN-modellen voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 273, Marknesse. Figuur 22 geeft de impuls-responsfuncties behorende bij deze relaties.

**Tabel 6** TFN-modellen voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 273 Marknesse.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur			Ruiscomponent			
	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.1582	0.7030	-	0.3941	-0.0512	-0.0197	-0.9118
10	0.2061	0.6614	-	0.4221	-0.1376	-0.0111	-0.9539
20	0.2613	0.6074	-	0.3343	-0.1198	0.0716	-0.9037
50	0.4120	0.4555	-	0.6603	-0.5071	0.0540	-0.8673
100	0.5907	0.2930	-	0.8526	-0.7696	0.0766	-0.9599

Resonse of soil temperatures at five depths to Air Temperature, 273 Marknesse



**Figuur 22** Impuls-responsfuncties voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 273 Marknesse.

Tabel 7 geeft de gekalibreerde parameterwaarden van de TFN-modellen met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer en bodemtemperatuur als uitvoer. De lage parameterwaarden voor de MA-parameters (omega's) geven aan dat neerslagsom van zeer geringe invloed is op de bodemtemperatuur.

**Tabel 7** TFN-modellen met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer en bodemtemperatuur als uitvoer, KNMI-station 273 Marknesse.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur		Neerslagsom			Ruiscomponent			
	delta_1	omega_0	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.1583	0.7036	-0.0183	-0.0003	0.0003	0.3860	-0.0389	-0.0223	-0.9099
10	0.2039	0.6620	-0.0055	0.0002	0.0007	0.2705	0.0137	0.0402	-0.9527
20	0.2582	0.6072	-0.0104	0.0004	0.0007	0.4935	-0.2749	0.0074	-0.8973
50	0.4086	0.4552	-0.0104	0.0007	0.0007	0.6490	-0.4955	0.0499	-0.8624
100	0.5891	0.2923	-0.0204	0.0005	0.0006	0.8709	-0.7843	0.0637	-0.9632

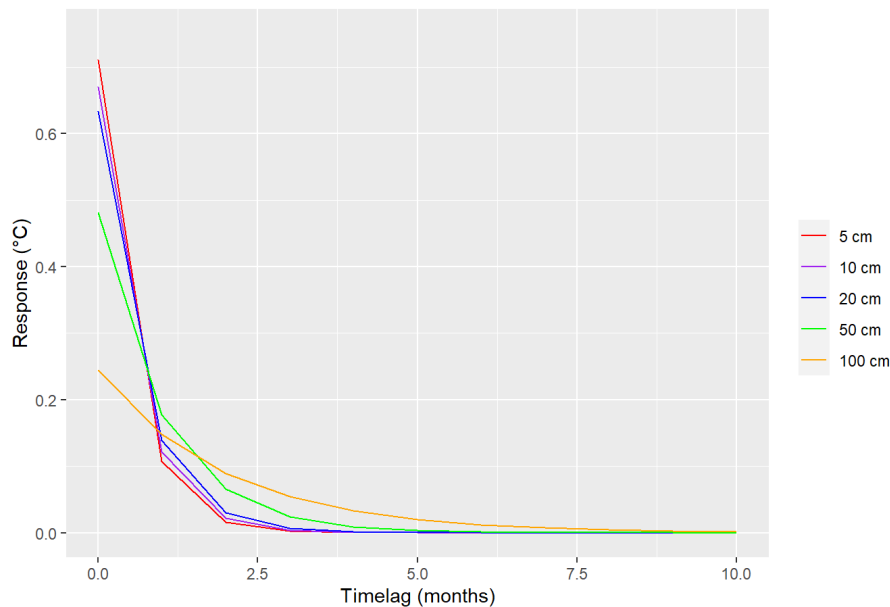
### B1.2.3 Gemiddelde maandtemperaturen Nieuw Beerta 286

Tabel 8 geeft de gekalibreerde parameterwaarden van de TFN-modellen voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 286, Nieuw Beerta. Figuur 23 geeft de impuls-responsfuncties behorende bij deze relaties.

**Tabel 8** TFN-modellen voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 286 Nieuw Beerta.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur			Ruiscomponent			
	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.1506	0.7111	-	0.2805	0.0989	0.2305	-0.8770
10	0.1817	0.6708	-	0.2582	0.0817	0.2194	-0.8959
20	0.2189	0.6334	-	0.5437	-0.2540	0.0145	-0.8555
50	0.3685	0.4816	-	0.5210	-0.3754	0.0524	-0.8783
100	0.6047	0.2443	-	0.9726	-0.8231	-0.1136	-0.8481

Resonse of soil temperatures at five depths to Air Temperature, 286 Nieuw Beerta



**Figuur 23** Impuls-responsfuncties voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 286 Nieuw Beerta.

Tabel 9 geeft de gekalibreerde parameterwaarden van de TFN-modellen met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer en bodemtemperatuur als uitvoer. Vanaf 20 cm bleek het niet mogelijk om een TFN-model te kalibreren dat ook neerslagsom als invoer heeft.

**Tabel 9** TFN-modellen met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer en bodemtemperatuur als uitvoer, KNMI-station 286 Nieuw Beerta.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur		Neerslagsom		Ruiscomponent				
	delta_1	omega_0	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.1508	0.7134	0.0040	-0.0015	0.0008	0.2835	0.1102	0.2272	-0.8745
10	0.1811	0.6730	0.0002	-0.0012	0.0011	0.2565	0.0964	0.2148	-0.8924
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-

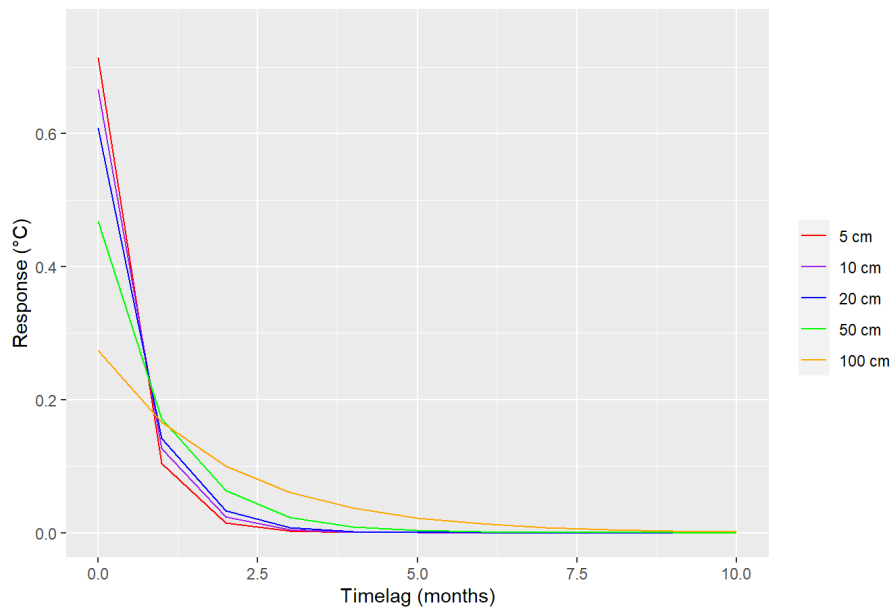
#### B1.2.4 Gemiddelde maandtemperaturen Wilhelminadorp 323

Tabel 10 geeft de gekalibreerde parameterwaarden van de TFN-modellen voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 286, Nieuw Beerta. Figuur 24 geeft de impuls-responsfuncties behorende bij deze relaties.

**Tabel 10** TFN-modellen voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 323 Wilhelminadorp.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur		Ruiscomponent				
	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.1454	0.7140	-	0.4342	-0.1581	0.1709	-0.8199
10	0.1900	0.6667	-	0.6148	-0.3076	0.1684	-0.8430
20	0.2336	0.6082	-	0.4938	-0.2566	0.1817	-0.8594
50	0.3674	0.4676	-	0.5829	-0.3755	0.1331	-0.8277
100	0.6045	0.2744	-	0.5861	-0.1902	0.0803	-0.8205

Resonse of soil temperatures at five depths to Air Temperature, 323 Wilhelminador



**Figuur 24** Impuls-responsfuncties voor de relatie tussen bodemtemperatuur en luchttemperatuur bij KNMI-station 323 Wilhelminadorp.

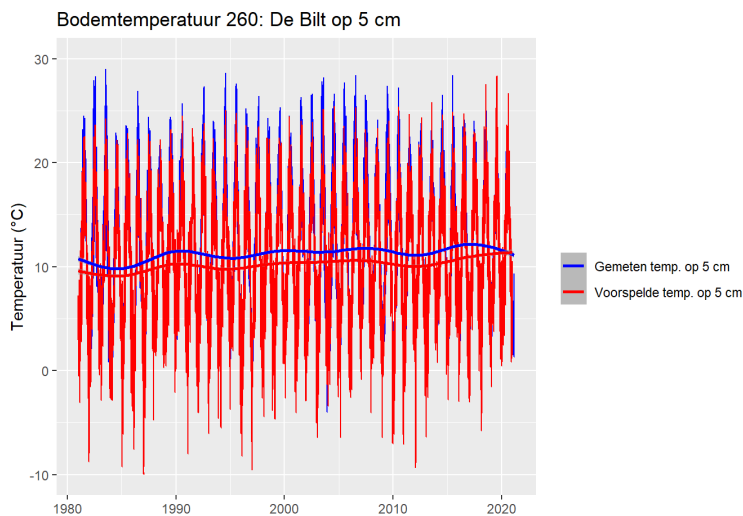
Tabel 11 geeft de gekalibreerde parameterwaarden van de TFN-modellen met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer en bodemtemperatuur als uitvoer. Uit de kleine waarden van de *moving average*-parameters in de transfercomponent van de neerslagsom blijkt dat deze nauwelijks bijdraagt aan de dynamiek van de bodemtemperatuur.

**Tabel 11** TFN-modellen met luchttemperatuur en neerslagsom als invoer en bodemtemperatuur als uitvoer, KNMI-station 323 Wilhelminadorp.

Diepte (cm)	Luchttemperatuur		Neerslagsom		Ruiscomponent				
	delta_1	omega_0	delta_1	omega_0	omega_1	phi_1	theta_1	theta_2	Theta_12
5	0.1468	0.7150	-0.0013	-0.0005	0.0011	0.4243	-0.1353	0.1638	-0.8175
10	0.1911	0.6681	-0.2658	-0.0002	0.0009	0.6114	-0.2943	0.1678	-0.8468
20	0.2336	0.6099	0.0032	0.0000	0.0010	0.4836	-0.2417	0.1839	-0.8598
50	0.3663	0.4709	0.0044	-0.0000	0.0008	0.5701	-0.3623	0.1375	-0.8255
100	0.6028	0.2748	0.0000	0.0003	0.0002	0.5824	-0.1845	0.0793	-0.8210

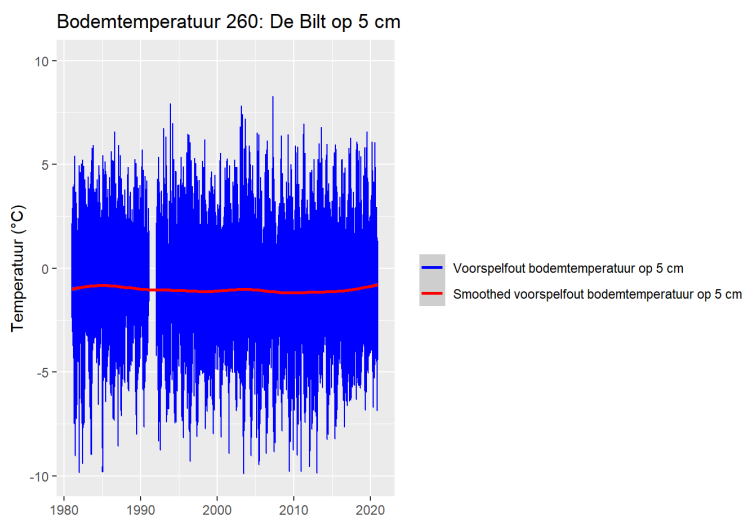
## Bijlage 2 Analyse SWAP-voorspellingen van bodemtemperatuur

Met het model SWAP zijn voorspellingen gemaakt van de zesuurlijkse bodemtemperatuur op 5 cm diepte. Figuur 25 geeft een tijdreeksgrafiek van deze voorspellingen en de waargenomen bodemtemperaturen. Met een gam-filter ( $y \sim s(x, bs = "cs"$ , "cs" zijn cubic regression splines) zijn de langjarige trends zichtbaar gemaakt. Zowel de voorspelde als de gemeten temperaturen tonen een gemiddelde stijging sinds 1980. Opmerkelijk is dat sinds circa 2017 de gemeten bodemtemperaturen gemiddeld genomen lijken te dalen terwijl de voorspelde bodemtemperaturen stijgen. Verder laat de tijdreeksgrafiek in Figuur 25 zien dat de gemeten bodemtemperaturen gemiddeld genomen iets hoger liggen dan de voorspelde bodemtemperaturen.



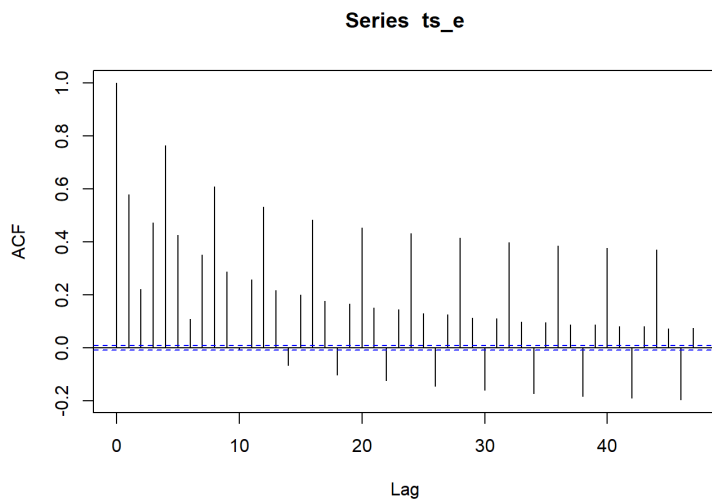
**Figuur 25** Gemeten en voorspelde zesuurlijkse bodemtemperatuur op 5 cm diepte bij KNMI-station 260 De Bilt. Voorspellingen met SWAP. Smoothing met een gam-filter.

Figuur 26 geeft een tijdreeksgrafiek van de voorspelfouten (voorspelling-waarneming). De gemiddelde voorspelfout bedraagt  $-1,04^{\circ}\text{C}$ . De standaardafwijking van de voorspelfouten bedraagt  $2,23^{\circ}\text{C}$ .



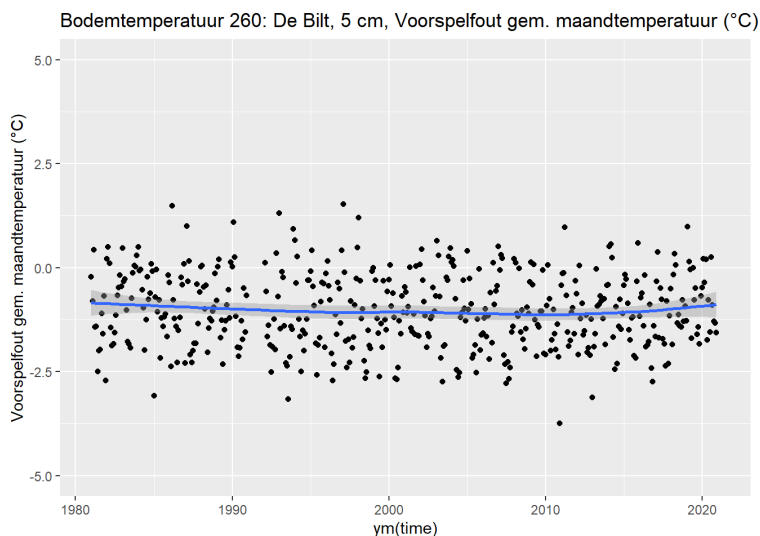
**Figuur 26** Tijdreeksgrafiek van voorspelfouten in zes-uurlijkse bodemtemperaturen op 5 cm, voorspeld met SWAP, bij KNMI-station 260 De Bilt.

Figuur 27 geeft de auto-correlatiefunctie van de voorspelfouten. Deze laat zien dat de voorspelfouten hoge autocorrelaties bevatten, met een seizoensafstand van vier *lags* (één etmaal). Dit betekent dat SWAP de dynamische structuur van zes-uurlijkse bodemtemperatuur niet volledig beschrijft.



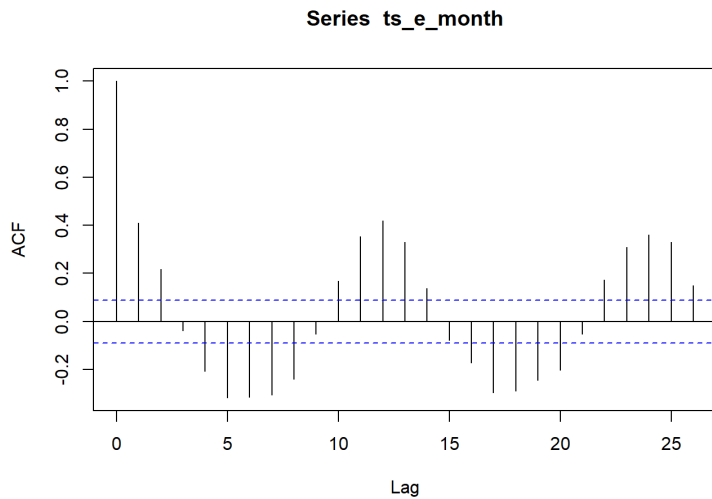
**Figuur 27** Auto-correlatiefunctie van de voorspelfouten. Lag = 6 uur.

Om te beoordelen of de SWAP-voorspellingen de dynamische structuur van bodemtemperatuur op maandbasis verklaren, zijn de voorspelfouten geaggregeerd naar maandgemiddelden. Figuur 28 toont een tijdreeksgrafiek van deze maandgemiddelden.



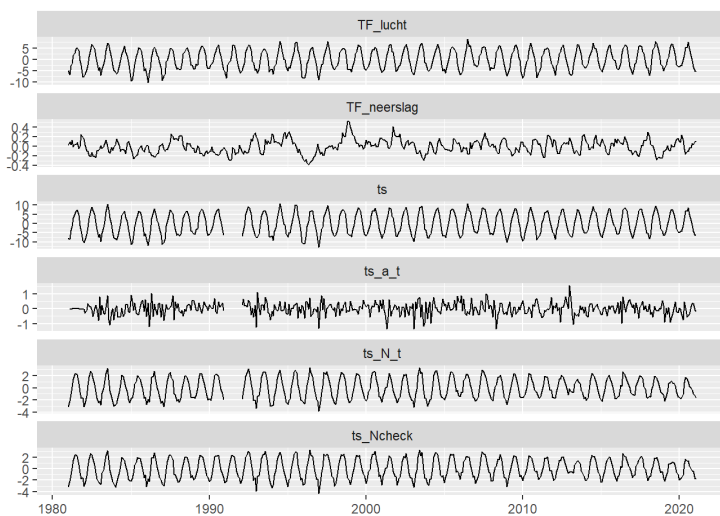
**Figuur 28** Maandgemiddelden van voorspelfouten in zes-uurlijkse bodemtemperatuur op 5 cm, gemaakt met SWAP, voor KNMI-station 260 De Bilt.

Figuur 29 toont de auto-correlatiefunctie van de maandgemiddelde voorspelfouten. Deze laat een seizoensaliteit met een afstand van twaalf maanden zien. Hieruit blijkt dat de SWAP-voorspellingen de dynamische structuur van bodemtemperaturen op maandbasis niet volledig beschrijven.



**Figuur 29** Auto-correlatiefunctie van maandgemiddelde voorspelfouten. Lag = maand.

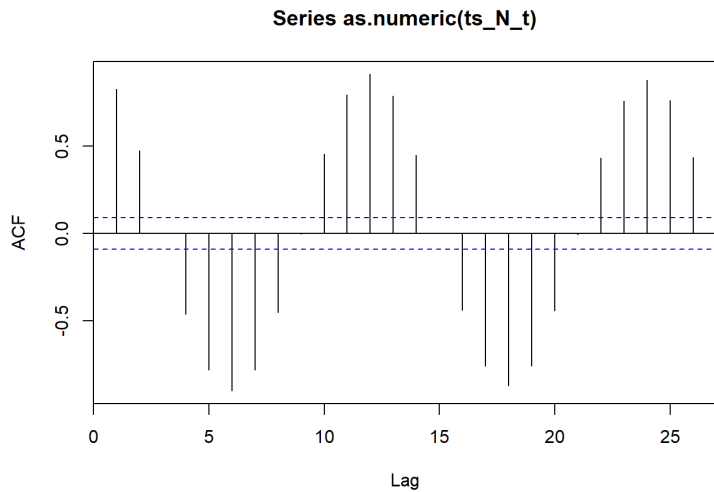
Ter vergelijking geven we de resultaten van TFN-modellering van bodemtemperaturen op maandbasis, met luchttemperatuur en neerslagsom als invoerreeksen, voor de diepte 5 cm bij KNMI-station 260 De Bilt (zie Tabel 5). De ruisreeks  $N_t$  is te vergelijken met de reeks voorspelfouten van de SWAP-voorspellingen. Het gemiddelde van  $N_t$  is  $-0,035^{\circ}\text{C}$ , de standaardafwijking van  $N_t$  is  $1,67^{\circ}\text{C}$ . Dit is dus lager dan de standaardafwijking van de SWAP-voorspelfouten ( $2,23^{\circ}\text{C}$ ).



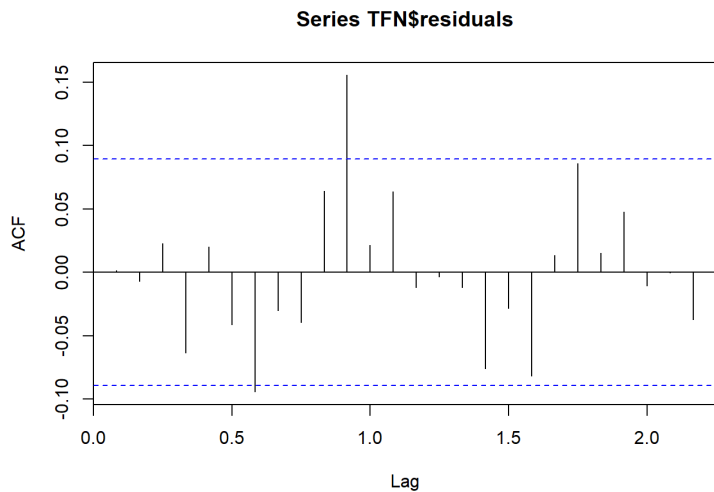
**Figuur 30** Resultaten TFN-modellering maandgemiddelde bodemtemperatuur op 5 cm bij KNMI-station 260 De Bilt.  $TF\_lucht$  is de transfercomponent als gevolg van luchttemperatuur,  $TF\_neerslag$  is de transfercomponent als gevolg van neerslagsom,  $ts$  is de tijdreeks van gemiddelde bodemtemperaturen,  $ts\_a\_t$  is de residureeks (innovaties),  $ts\_N\_t$  is de ruisreeks (deel van bodemtemperatuur dat niet verklaard wordt uit luchttemperatuur en neerslagsom),  $ts\_N\_t$  is de transformatie van  $ts\_a\_t$  in  $ts\_N\_t$  met de gekalibreerde parameterwaarden voor het ruismodel.

Figuur 31 geeft de auto-correlatiefunctie van de ruisreeks  $N_t$ . Vergeleken met Figuur 29 bevat de ruiscomponent van het TFN-model meer autocorrelatie met seizoenstructuur dan de SWAP-voorspelfouten. De ruiscomponent is gemodelleerd met een SARIMA(1,0,2, 0,1,1,12)-model. Figuur 32 geeft de auto-correlatiefunctie van de residuen. Autocorrelaties zijn niet geheel verdwenen, maar wel afgenomen t.o.v. Figuur 31.





**Figuur 31** Auto-correlatiefunctie van de ruiscomponent van het TFN-model voor maandgemiddelde bodemtemperatuur op 5 cm bij KNMI-station 260 De Bilt (invoer: luchttemperatuur en neerslagsom). Lag = maand.



**Figuur 32** Residuele auto-correlatiefunctie. Lag\*12.

---

## Bijlage 3 Bodemtemperatuur en bodemprocessen

Zowel bodemvocht als bodemtemperatuur bepaalt in grote mate de mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie in bodems en dat betekent dat simulatiemodellen deze grootheden nauwkeurig moeten kunnen berekenen, zeker ook met het oog op toekomstvoorspellingen op basis van klimaatveranderingen (Salo et al., 2016). Zij beschouwden in hun onderzoek elf bodem-gewasmodellen, waarvan er tien daadwerkelijk rekening houden met effect bodemtemperatuur op genoemde processen: APSIM, CERES, CROPSYST, COUP, DAISY, EPIC, FASSET, HERMES, MONICA, STICS (NB Ook WOFOST maakte onderdeel uit in hun studie, maar WOFOST beschouwt geen bodemtemperatuur en processen die daar van afhankelijk zijn).

Voor deze genoemde modellen, aangevuld met de Nederlandse modellen SWAP-WOFOST (Kroes et al., 2017; Groenendijk et al., 2017) en ANIMO (Groenendijk et al., 2005; Renaud et al., 2005), worden hieronder de temperatuurafhankelijkheden voor de processen mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie vermeld. Aan het eind wordt ook kort omschreven dat in sommige gevallen de bodemtemperatuur eveneens van invloed is op gewasgroei en op wortelademhaling gerelateerde processen.

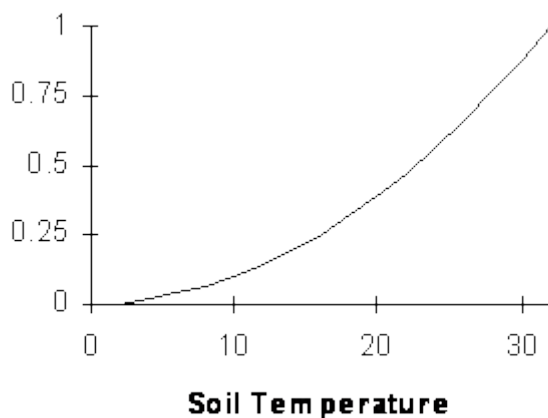
## B3.1 Mineralisatie

---

### Model Mineralisatie - Temperatuur afhankelijkheid

---

APSIM  $M = f(\theta, T, C:N)$ , multiplicatief



**Figure 3** Temperature factor affecting mineralisation rates of the various soil organic matter pools.

Deze figuur beschrijft een  $Q_{10}$  relatie:  $f_T = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})}$  met  $Q_{10} = 2.44$  en  $T_{ref} = 31.5$  °C

bron: <https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/soiln/>

---

CERES  $M = f(\theta, T, C:N)$ , multiplicatief

$$f_T = \frac{(T-5)}{30} \quad (\text{Godwin \& Jones, 1991; Godwin \& Singh, 1998})$$

bron: <https://dssat.net/models-overview/components/ceres-godwin-soil-organic-matter-module/>

---

CROPSYST De mineralisatie snelheidsconstante is direct een functie van bodemtemperatuur

$$K_M(T_s) = \begin{cases} \frac{\exp\left(17.753 - \frac{6350.5}{T_s + 273}\right)}{604,800} & T \leq 35 \\ K_M(35) & 35 < T \end{cases}$$

bron: Stockle & Campbell, 1989; Trans ASAE 32(1): 66-74

NB:  $K_M$  heeft de eenheid  $\text{sec}^{-1}$

Dit betreft een rechtstreekse berekening van de mineralisatieconstante  $K_M$  met eenheid  $\text{tijd}^{-1}$ . De feitelijke temperatuurcorrectie die hier plaatsvindt is vergelijkbaar met een Arrhenius temperatuurcorrectie volgens:

$$f(T) = \exp\left(k_A \frac{T - T_{ref}}{T T_{ref}}\right)$$

met  $k_A = 6350.5$  K en  $T$  en  $T_{ref}$  in K.

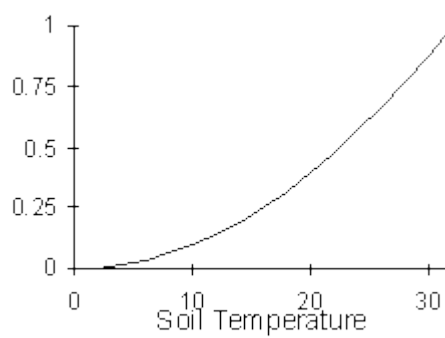
---

Model	Mineralisatie - Temperatuur afhankelijkheid
COUP	<p><math>M = f(C, \theta, T)</math>, multiplicatief</p> <p>Basis: Q10 relatie  <math>f_T = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})}</math></p> <p>Alternatief: tot aan een drempelwaarde voor <math>T</math> lineair van nul tot <math>f_T</math> en daarna de <math>Q_{10}</math> relatie.  Bijvoorbeeld: <math>Q_{10} = 2</math>, <math>T_{ref} = 20</math> °C; <math>T_{threshold} = 5</math> °C.</p> <p>Alternatief: O'Neill functie  <math display="block">f_T = \left( \frac{T_{ON,max} - T}{T_{ON,max} - T_{ON,opt}} \right)^{n_{ON}} \exp \left( n_{ON} \left( \frac{T - T_{ON,opt}}{T_{ON,max} - T_{ON,opt}} \right) \right)</math> Bijvoorbeeld: <math>T_{ON,max} = 42</math> °C, <math>T_{ON,opt} = 27.5</math> °C, <math>n_{ON} = 4.28</math></p> <p>Alternatief: Ratkowsky functie  <math display="block">f_T = \begin{cases} 0 &amp; T \leq T_{min} \\ \left( \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \right)^2 &amp; T_{min} &lt; T \leq T_{max} \\ 1 &amp; T_{max} &lt; T \end{cases}</math> Bijvoorbeeld: <math>T_{min} = -8</math> °C, <math>T_{max} = 20</math> °C</p> <p>bron: <a href="http://www.coupmodel.com/default.htm">http://www.coupmodel.com/default.htm</a> (Nitrogen and Carbon - above ground processes and common functions &gt; Common abiotic functions)</p>
DAISY	<p><math>M = f(lu, \theta, T)</math>, multiplicatief en onderling onafhankelijk;</p> $f_T = \begin{cases} 0 & T \leq 0 \\ 0.1T & 0 < T \leq 20 \\ \exp(0.47 - 0.027T + 0.001937T^2) & 20 < T \end{cases}$ <p>bron: <a href="https://daisy.ku.dk/about-daisy/">https://daisy.ku.dk/about-daisy/</a>  bron: Hansen et al., 1990</p>
EPIC	<p><math>M = f(N_{org}, BD, \theta, T)</math></p> <p><math>f_T</math>: zie denitrificatie</p>
FASSET	<p><math>M = f(\theta, T)</math>, multiplicatief</p> $f_T = 7.24 \exp \left( -3.432 + 0.168T \left( 1 - \frac{0.5T}{36.9} \right) \right)$ <p>bron: <a href="https://www.fasset.dk/">https://www.fasset.dk/</a>  bron: Petersen et al., 2005</p>
HERMES	<p><math>M = f(\theta, T)</math></p> <p>De afbraak snelheidsconstante verschilt per type organische stof en is een functie van <math>T</math> (type Arrhenius) (en een functie van <math>\theta</math>).</p> <p>Gemakkelijk afbreekbare OS (dpm):  <math display="block">k_{dpm}(T) = 4.0 \cdot 10^9 \exp \left( \frac{-8400}{T + 273} \right)</math></p> <p>Moeilijk afbreekbare OS (rpm):  <math display="block">k_{rpm}(T) = 5.6 \cdot 10^{12} \exp \left( \frac{-9800}{T + 273} \right)</math></p> <p>bron: <a href="https://www.zalf.de/en/forschung_lehre/software_downloads/Pages/default.aspx">https://www.zalf.de/en/forschung_lehre/software_downloads/Pages/default.aspx</a>  bron: Kersebaum, 1995</p> <p>Net als bij CROPSYST wordt hier rechtstreeks de afbraakconstante berekend als functie van <math>T</math>. De correctie lijkt op een Arrhenius-correctie. De constante term in de teller is hier wat hoger.</p> $f(T) = \exp \left( k_A \frac{T - T_{ref}}{T \cdot T_{ref}} \right)$ <p>met <math>k_A</math>, respectievelijk, 8400 K en 9800 K en <math>T</math> en <math>T_{ref}</math> in K.</p>

Model	Mineralisatie - Temperatuur afhankelijkheid
MONICA	<p><math>M = f(lu, \theta, T)</math> (bron: DAISY)</p> <p>bron: <a href="https://gitlab.com/zalf-rpm/monica-docs/-/blob/master/soil_processes/organic_matter_turn-over_en.md">https://gitlab.com/zalf-rpm/monica-docs/-/blob/master/soil_processes/organic_matter_turn-over_en.md</a></p>
STICS	<p>Mineralisatie voor gemakkelijk en moeilijk afbreekbare fracties, elk met eigen afbraakconstante welke T afhankelijk volgens:</p> $k(T) = A Q_{10}^{0.1T} = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})}$ <p>met <math>A = Q_{10}^{-0.1T_{ref}}</math></p> <p>bron: <a href="https://www6.paca.inrae.fr/stics_eng/About-us">https://www6.paca.inrae.fr/stics_eng/About-us</a>  bron: Sierra &amp; Marban (2000); Brisson et al. (2003)</p>
SWAP-WOFOST-N	<p><math>M = f(\theta, T)</math></p> $f_T = \frac{\frac{1}{1 + \exp(-0.26(T - 17))} - \frac{1}{1 + \exp(-0.77(T - 41.9))}}{\frac{1}{1 + \exp(-0.26(T_{ref} - 17))} - \frac{1}{1 + \exp(-0.77(T_{ref} - 41.9))}}$ <p><math>T_{ref}</math> is de referentie temperatuur waarvoor geldt <math>f_T = 1</math> (Groenendijk et al., 2017).</p>
ANIMO	<p><math>M = f(O_2, \theta, T, pH; \text{soms ook diepte});</math> multiplicatief; <math>f(T)</math> is van Arrhenius-type</p> $f(T) = \exp\left(-\frac{\mu}{R_{gas}} \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{T_{ref} + 273}\right)\right)$ <p>met <math>m</math> de molaire activatie energie (<math>J \text{ mol}^{-1}</math>) en <math>R_{gas}</math> de universele gasconstante (<math>= 8.3144 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}</math>).  Bijvoorbeeld: <math>m = 74826 \text{ J mol}^{-1}</math>.</p> <p>Bron: Groenendijk et al. (2005)</p>
CENTURY / DAYCENT	<p>Oude versie</p> $f_T = -0.06 + 0.13 \exp(0.08T)$ <p>Nieuwe versie</p> $f_T = 0.55 + 0.45 \arctan(0.1(T - 15))$ <p>Bron: <a href="https://www2.nrel.colostate.edu/projects/daycent-downloads.html">https://www2.nrel.colostate.edu/projects/daycent-downloads.html</a>, Century4.0_to_DayCent4.5.ppt</p>
DNDC	<p>Mineralisatie</p> $f_T = \begin{cases} T / 30 & T \leq 30 \\ 1 & 30 < T < 40 \\ 1 - 0.4(T - 40) / 10 & 40 \leq T \end{cases}$ <p>Bron: Li et al. (1992)</p>
EU-Rotate_N	<p>Mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie zijn beschreven zoals DAISY.</p> <p>Bron: Rahn et al. (2017; 2010)</p>
MOTOR	<p>Alleen mineralisatie: <math>M = f(\theta, T)</math></p> $f_T = \frac{47.9}{1 + \exp\left(\frac{106}{T + 18.3}\right)}$ <p>Bron: Assinck en Rappoldt (2004), gebaseerd op Bradbury et al. (1993)</p>
NDICEA	<p><math>M = f(\theta, T, pH, \text{protection factor})</math></p> $f_T = \begin{cases} 0 & T \leq -1 \\ 0.09(T + 1) & -1 < T \leq 9 \\ 0.88Q_9^{(T-9)/9} & 9 < T \leq 27 \\ 3.5 & 27 < T \end{cases}$ <p>Deze <math>f_T</math> relatie komt van Yang (1996) en hierin is <math>Q_9 = 2</math>, waarbij <math>f_T</math> verdubbeld bij elke <math>9 \text{ }^\circ\text{C}</math> stijging (<math>Q_9 = 2</math> is identiek aan <math>Q_{10} = 2^{10/9} = 2.16</math>)</p> <p>Bron: Van der Burgt et al. (2006); Yang (1996)</p>

Model	Mineralisatie - Temperatuur afhankelijkheid
PASTIS / CANTIS	<p>Mineralisatie en nitrificatie</p> $f_T = \exp(B_T(T - T_{ref}))$ <p>voor 'humified organic matter': <math>B_T = 0.115 \text{ K}^{-1}</math>            voor 'fresh organic matter', 'soluble organic compounds' en nitrificatie: <math>B_T \text{ (K}^{-1}\text{) varieert per temperature range:}</math></p> $B_T = \begin{cases} 0.221 & 0 \leq T < 5 \\ 0.162 & 5 \leq T < 10 \\ 0.109 & 10 \leq T < 15 \\ 0.085 & 15 \leq T < 20 \\ 0.085 & 20 \leq T \end{cases}$ <p>Bron: Garnier et al. (2001)</p>
RothC	<p>Alleen mineralisatie: <math>M = f(\theta, T)</math></p> $f_T = \frac{47.9}{1 + \exp\left(\frac{106}{T + 18.3}\right)}$ <p>In RothC wordt in tijdstappen van 1 maand gerekend, en is <math>T</math> de gemiddelde maandtemperatuur van de lucht.</p> <p>Bron: Coleman &amp; Jenkinson (2014), gebaseerd op Bradbury et al. (1993)</p>
SOILN	<p>Mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie:</p> $f_T = Q_{10}^{0.1(T - T_{ref})}$ <p>Bron: Johnsson et al. (1987)            NB: Johnsson et al. (1987) gebruikten <math>Q_{10} = 3</math> met argument dat onder relatief koude (Scandinavische) omstandigheden de activiteit niet te hoog ingeschat mag worden.</p>
SUNDIAL	<p>Mineralisatie en nitrificatie:</p> $f_T = \frac{47.9}{1 + \exp\left(\frac{106}{T + 18.3}\right)}$ <p>Bron: Bradbury et al. (1993)</p>
SWAT	<p>Mineralisatie (netto): <math>M = f(\theta, T; \text{C:N})</math></p> $f_T = \max\left[0.1, 0.1 + 0.9 \frac{T}{T + \exp(9.93 - 0.312T)}\right]$ <p>Bron: Neitsch et al., 2011</p>

## B3.2 Nitrificatie

Model	Nitrificatie - Temperatuur afhankelijkheid
APSIM	$N = N_{pot} * \text{MIN}(f_{\theta}, f_T, f_{pH})$ 
	<p><b>Figure 6</b> Temperature factor affecting the nitrification rate of ammonium in each soil layer.</p> <p>Deze figuur ziet er identiek uit aan die voor mineralisatie.</p> <p>Bron: <a href="https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/soiln/">https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/soiln/</a></p>
CERES	$N = f(\text{NH}_4, \text{O}_2, \text{pH}, T, \theta)$ $f_T$ : zie mineralisatie
CROPSYST	<p>De nitrificatie snelheidsconstante is direct een functie van bodemtemperatuur</p> $K_N(T_s) = \begin{cases} (0.0105T_s + 0.00095T_s^2)K_N(35) & 0 < T_s \leq 10 \\ (0.032T_s - 0.12)K_N(35) & 10 < T_s \leq 35 \\ (-0.1T_s + 4.5)K_N(35) & 35 < T_s \leq 45 \end{cases}$ <p>(Stockle &amp; Campbell, 1989; Trans ASAE 32(1): 66-74)</p> <p>Dit betreft een rechtstreekse berekening van de nitrificatieconstante <math>K</math> met eenheid <math>\text{tijd}^{-1}</math>. De feitelijke temperatuurcorrectie die hier plaatsvindt kan gezien worden als</p> $f(T_s) = \frac{K_N(T_s)}{K_N(35)}$
COUP	$N = f(\text{NH}_4, \text{NO}_3, \text{pH}, T, \theta)$ $f_T$ : zie mineralisatie
DAISY	$N = f(\theta, T)$ , multiplicatief en onderling onafhankelijk; $f_T = \begin{cases} 0 & T \leq 2 \\ 0.15(T - 2) & 2 < T \leq 6 \\ 0.17 & 6 < T \leq 20 \\ \exp(0.47 - 0.027T + 0.00193T^2) & 20 < T < 40 \end{cases}$ <p>Bron: <a href="https://daisy.ku.dk/about-daisy/">https://daisy.ku.dk/about-daisy/</a></p> <p>Bron: Hansen et al., 1990</p>
EPIC	Niet als apart proces beschreven.
FASSET	$N = f(\theta, T)$ , multiplicatief $f_T = 7.24 \exp\left(-3.432 + 0.168T \left(1 - \frac{0.5T}{36.9}\right)\right)$ <p>NB: aanvullende (andere) temperatuurcorrecties worden toegepast op berekening van de <math>\text{N}_2\text{O}</math> die tijdens (de)nitrificatie gevormd wordt</p> <p>Bron: <a href="https://www.fasset.dk/">https://www.fasset.dk/</a></p> <p>Bron: Chatskikh et al., 2005</p>
HERMES	Nitrificatie is onderdeel van de netto-mineralisatie.
	Bron: Kersebaum, 1995

Model	Nitrificatie - Temperatuur afhankelijkheid
MONICA	<p><math>N = f(\theta, T)</math>, multiplicatief (bron: DAISY)</p> <p>Bron: <a href="https://gitlab.com/zalf-rpm/monica-docs/-/blob/master/soil_processes/nitrification_and_denitrification_en.md">https://gitlab.com/zalf-rpm/monica-docs/-/blob/master/soil_processes/nitrification_and_denitrification_en.md</a></p>
STICS	<p>Nitrificatie snelheidsconstante T afhankelijk volgens:</p> $k(T) = \begin{cases} FQ_{10}^{0.1T} = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})} & T \leq 40 \\ 0 & T = 50 \end{cases}$ <p>Apart: wat gebeurt er dan tussen 40 en 50 °C? Sierra &amp; Marban (2000) vermelden hierbij "Note that the response between 40 and 50°C is not known."</p> <p>Er wordt geen waarde voor F gegeven: deze wordt berekend als functie van het watergehalte.</p> <p>Bron: <a href="https://www6.paca.inrae.fr/stics_eng/About-us">https://www6.paca.inrae.fr/stics_eng/About-us</a> Bron: Sierra &amp; Marban (2000); Brisson et al. (2003)</p>
SWAP-WOFOST-N	<p>De eerste-orde nitrificatieconstante: <math>f_T(\theta, T)</math></p> $f_T = \frac{\frac{1}{1 + \exp(-0.26(T - 17))} - \frac{1}{1 + \exp(-0.77(T - 41.9))}}{\frac{1}{1 + \exp(-0.26(T_{ref} - 17))} - \frac{1}{1 + \exp(-0.77(T_{ref} - 41.9))}}$ <p><math>T_{ref}</math> is de referentie temperatuur waarvoor geldt <math>f_T = 1</math> (Groenendijk et al., 2017).</p>
ANIMO	<p><math>N = f(O_2, \theta, T, pH)</math>; multiplicatief</p> <p><math>f(T)</math>: zie mineralisatie</p>
CENTURY / DAYCENT	Zie mineralisatie
DNDC	<p>Nitrificatie</p> $f_T = \begin{cases} T / 35 & T \leq 35 \\ 1 - (T - 35) / 10 & 35 < T < 45 \\ 0 & 45 \leq T \end{cases}$ <p>Bron: Li et al. (1992)</p>
EU-Rotate_N	<p>Mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie zijn beschreven zoals DAISY.</p> <p>Bron: Rahn et al. (2017; 2010)</p>
MOTOR	Alleen mineralisatie: $M = f(\theta, T)$
NDICEA	Nitrificatie: niet gemodelleerd.
PASTIS / CANTIS	<p>Mineralisatie en nitrificatie</p> $f_T = \exp(B_T(T - T_{ref}))$ <p>voor 'humified organic matter': <math>B_T = 0.115 \text{ K}^{-1}</math> voor 'fresh organic matter', 'soluble organic compounds' en nitrificatie: <math>B_T (\text{K}^{-1})</math> varieert per temperature range:</p> $B_T = \begin{cases} 0.221 & 0 \leq T < 5 \\ 0.162 & 5 \leq T < 10 \\ 0.109 & 10 \leq T < 15 \\ 0.085 & 15 \leq T < 20 \\ 0.085 & 20 \leq T \end{cases}$ <p>Bron: Garnier et al. (2001)</p>
RothC	Alleen mineralisatie
SOILN	<p>Mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie:</p> $f_T = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})}$ <p>bron: Johnsson et al. (1987) NB: Johnsson et al. (1987) gebruikten <math>Q_{10} = 3</math> met argument dat onder relatief koude (Scandinavische) omstandigheden de activiteit niet te hoog ingeschat mag worden.</p>



---

<b>Model</b>	<b>Nitrificatie - Temperatuur afhankelijkheid</b>
--------------	---

---

SUNDIAL	Mineralisatie en nitrificatie:
---------	--------------------------------

$$f_T = \frac{47.9}{1 + \exp\left(\frac{106}{T + 18.3}\right)}$$

Bron: Bradbury et al. (1993)

---

SWAT	Nitrificatie: $n = f(\theta, T, \text{diepte})$
------	---

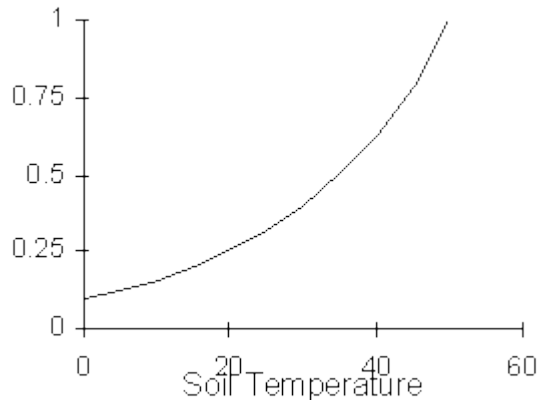
$$f_T = 0.41 \frac{(T - 5)}{10}$$

Bron: Neitsch et al., 2011

---

## B3.3 Denitrificatie

Model	Denitrificatie - Temperatuur afhankelijkheid
APSIM	$D = 0.006 * NO_3 * C_{act} * f_{\theta} * f_T * f_{pH}$



**Figure 9** Temperature factor affecting the denitrification of nitrate in each soil layer.

Deze figuur beschrijft een  $Q_{10}$  relatie:  $f_T = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})}$  met  $Q_{10} = 1.58$  en  $T_{ref} = 50$  °C

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

CERES	$N = f(C_w, NO_3, BD, T, \theta)$ $f_T$ : zie mineralisatie
-------	--

CROPSYST	De denitrificatie snelheidsconstante is direct een functie van bodemtemperatuur
----------	---

$$K_D(T_s) = \begin{cases} 0.67K_D(15) \exp(0.43(T_s - 10)) & T < 10 \\ K_D(15) \exp(0.08(T_s - 15)) & 10 \leq T \end{cases}$$

(Stockle & Campbell, 1989; Trans ASAE 32(1): 66-74)

check: voor  $T_s = 10$  °C berekenen beide takken dezelfde  $K_D$ -waarde (i.e.  $0.67K_D(15)$ )

Dit betreft een rechtstreekse berekening van de denitrificatieconstante  $K_D$  met eenheid  $\text{tijd}^{-1}$ . De feitelijke temperatuurcorrectie die hier plaatsvindt kan gezien worden als

$$f(T_s) = \frac{K_D(T_s)}{K_D(35)}$$

COUP	$N = f(\text{dpot}, z, NO_3, T, \theta)$ $f_T$ : zie mineralisatie
------	---

DAISY	$D = f(\theta, T)$ , multiplicatief en onderling onafhankelijk;
-------	---

$$f_T = \begin{cases} 0 & T \leq 2 \\ 0.15(T - 2) & 2 < T \leq 6 \\ 0.1T & 6 < T \leq 20 \\ \exp(0.47 - 0.027T + 0.00193T^2) & 20 < T < 40 \end{cases}$$

Bron: <https://daisy.ku.dk/about-daisy/>

Bron: Hansen et al., 1990

Model	Denitrificatie - Temperatuur afhankelijkheid
EPIC	<p>Denitrificatie wordt berekend als:</p> $D = \begin{cases} 0 & SWF < 0.9 \\ W_{NO_3} (1 - \exp(1.4f_T C)) & 0.9 \leq SWF \end{cases}$ <p>met</p> $f_T = \begin{cases} 0 & T \leq 0 \\ \frac{T}{T + \exp(9.93 - 0.312T)} & 0 < T \end{cases}$ <p>Met <math>W_{NO_3}</math> de hoeveelheid nitraat, <math>C</math> de hoeveelheid koolstof, en <math>SWF</math> is de verzadigingsgraad.</p> <p>Bron: <a href="https://epicapex.tamu.edu/manuals-and-publications/">https://epicapex.tamu.edu/manuals-and-publications/</a> Bron: Sharpley &amp; Williams (1990)</p>
FASSET	<p><math>D = f(\theta, T)</math>, multiplicatief</p> $f_T = 7.24 \exp\left(-3.432 + 0.168T\left(1 - \frac{0.5T}{36.9}\right)\right)$ <p>NB: aanvullende (andere) temperatuurcorrecties worden toegepast op berekening van de <math>N_2O</math> die tijdens (de)nitricatie gevormd wordt</p> <p>Bron: <a href="https://www.fasset.dk/">https://www.fasset.dk/</a> Bron: Chatskikh et al., 2005</p>
HERMES	<p><math>D = f(NO_3, \theta, T)</math>, multiplicatief</p> $f_T = 1 - \exp\left(-\left(\frac{T}{T_{crit}}\right)^{4.6}\right)$ <p>Bijvoorbeeld: <math>T_{crit} = 15.5</math> °C</p> <p>Bron: <a href="https://www.zalf.de/en/forschung_lehre/software_downloads/Pages/default.aspx">https://www.zalf.de/en/forschung_lehre/software_downloads/Pages/default.aspx</a> Bron: Kersebaum, 1995</p>
MONICA	<p><math>D = f(\theta, T)</math>, multiplicatief (bron: DAISY)</p> <p>Bron: <a href="https://gitlab.com/zalf-rpm/monica-docs/-/blob/master/soil_processes/nitrification_and_denitrification_en.md">https://gitlab.com/zalf-rpm/monica-docs/-/blob/master/soil_processes/nitrification_and_denitrification_en.md</a></p>
STICS	<p><math>D = f(NO_3, \theta, T)</math>, multiplicatief</p> $f_T = \begin{cases} \exp\left(\frac{(T - 11)\ln(89) - 9\ln(2.1)}{10}\right) & T < 11 \\ \exp\left(\frac{(T - 20)\ln(2.1)}{10}\right) & 11 \leq T \end{cases}$ <p>Bron: <a href="https://www6.paca.inrae.fr/stics_eng/About-us">https://www6.paca.inrae.fr/stics_eng/About-us</a> Bron: Hénault &amp; Germon (2000); Brisson et al. (2003)</p>
SWAP-WOFOST-N	<p>De eerste-orde denitrificatieconstante: <math>f(\theta, T)</math></p> $f_T = \frac{\frac{1}{1 + \exp(-0.26(T - 17))} - \frac{1}{1 + \exp(-0.77(T - 41.9))}}{\frac{1}{1 + \exp(-0.26(T_{ref} - 17))} - \frac{1}{1 + \exp(-0.77(T_{ref} - 41.9))}}$ <p><math>T_{ref}</math> is de referentie temperatuur waarvoor geldt <math>f_T = 1</math> (Groenendijk et al., 2017).</p>
ANIMO	<p>Het denitrificatieproces wordt niet expliciet gecorrigeerd voor bodemtemperatuur. Omdat denitrificatie lineair verloopt met de mineralisatie, vindt de T-correctie dus impliciet plaats omdat de mineralisatie wordt gecorrigeerd voor bodemtemperatuur.</p>
CENTURY / DAYCENT	Zie mineralisatie
DNDC	<p>Denitrificatie</p> $f_T = Q_{10}^{0.1(T - T_{ref})}$ <p>met <math>Q_{10} = 2</math> en <math>T_{ref} = 22.5</math> °C</p> <p>Bron: Li et al. (1992)</p>

<b>Model</b>	<b>Denitrificatie - Temperatuur afhankelijkheid</b>
EU-Rotate_N	Mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie zijn beschreven zoals DAISY.  Bron: Rahn et al. (2017; 2010)
MOTOR	Alleen mineralisatie: $M = f(\theta, T)$
NDICEA	Denitrificatie: proportioneel met mineralisatie; geen aparte T-correctie (immers mineralisatie is al gecorrigeerd voor T)  Bron: Van der Burgt et al. (2006); Yang (1996)
RothC	Alleen mineralisatie
SOILN	Mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie: $f_T = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})}$  Bron: Johnsson et al. (1987) NB: Johnsson et al. (1987) gebruikten $Q_{10} = 3$ met argument dat onder relatief koude (Scandinavische) omstandigheden de activiteit niet te hoog ingeschat mag worden.
SUNDIAL	Denitrificatie: proportioneel met mineralisatie; geen aparte T-correctie (immers mineralisatie is al gecorrigeerd voor T)  Bron: Bradbury et al. (1993)
SWAT	Denitrificatie: $f_T$ hetzelfde als voor mineralisatie  Bron: Neitsch et al., 2011

## B3.4 Veenoxidatie

Bij veengronden spreekt men vaak over veenoxidatie, waarmee bedoeld wordt op de afbraak van veen. In feite is dit hetzelfde als mineralisatie of afbraak van veen (Hendriks, 1991; Van den Akker et al., 2007). Dus voor veenoxidatie kunnen dezelfde procesbeschrijvingen en bijbehorende temperatuurreductiefuncties gebruikt worden als beschreven bij het onderdeel mineralisatie.

De volgende factoren zijn van invloed op de afbraak en mineralisatie van organische stof: vochtgehalte, zuurstofvoorziening, voedingselementen, temperatuur, zuurgraad en lutumgehalte (Van den Akker et al., 2007). Het afbraakproces is onafhankelijk van de temperatuur, maar de afbraaksnelheid is hier wel van afhankelijk. Van den Akker et al. (2007) geven een kort overzicht van temperatuurafhankelijkheden zoals gemeten voor veengronden. Deze blijken alle beschreven te worden met een  $Q_{10}$ -relatie, met  $Q_{10}$  meestal in de range 2-3, en soms iets hoger. Soms wordt waargenomen dat  $Q_{10}$  toeneemt met de diepte: micro-organismen boven in het profiel zijn dan beter aangepast aan de daar heersende omstandigheden en reageren daarom minder sterk op de daar heersende temperatuurfluctuaties.

Voor Nederlandse omstandigheden hebben Vermeulen & Hendriks (1996; zie ook Hendriks & Vermeulen, 1997) onder meer de temperatuurafhankelijkheid van veenmineralisatie gemeten (Figuur 1). Hierin zijn de relatieve afbraaksnelheden ten opzichte van een referentietemperatuur van 10,5°C weergegeven. Het verband is door een exponentiële relatie gegeven volgens

$$f_T = \exp(0.127(T - T_{ref}))$$

Dit is identiek aan een  $Q_{10}$  relatie volgens

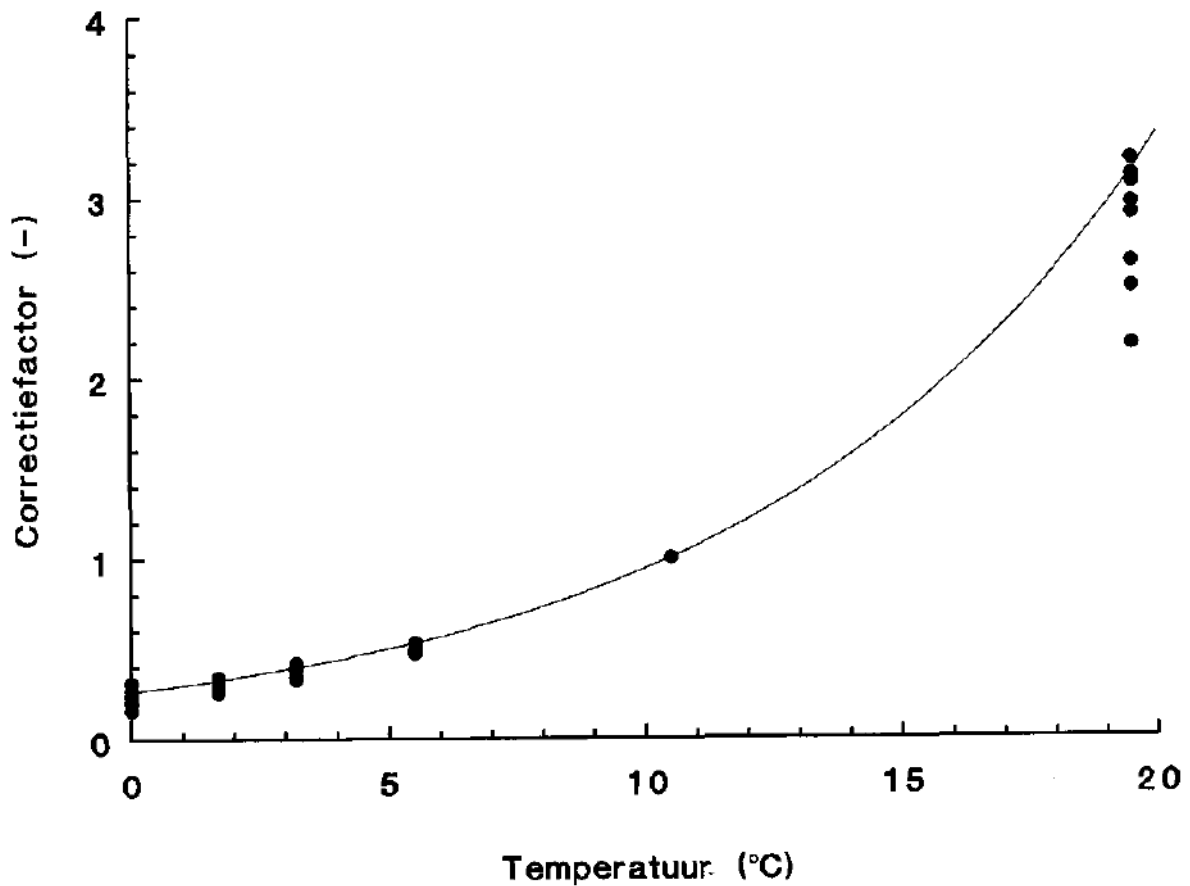
$$f_T = Q_{10}^{0.1(T - T_{ref})}$$

waarbij  $Q_{10} = \exp(0.127/0.1) = 3.56$ .

We zien wel dat deze relatie met name de metingen bij de hoge temperaturen overschat, hetgeen past bij de relatief hoge waarde voor  $Q_{10}$ . Hendriks & Vermeulen (1997) geven aan dat de acht meetpunten bij de hoogste temperatuur duidelijk onderscheid vertonen tussen monsters uit de bovengrond (de onderste vier meetpunten) en monsters uit de ondergrond (bovenste vier meetpunten). Zij maken dan ook onderscheid tussen  $Q_{10}$ -waarden voor boven- en ondergrond en tevens voor temperatuurrange (Tabel 1).

**Tabel 1**  $Q_{10}$  waarden voor boven- en ondergronden voor twee temperatuurranges (bron: Hendriks & Vermeulen, 1997).

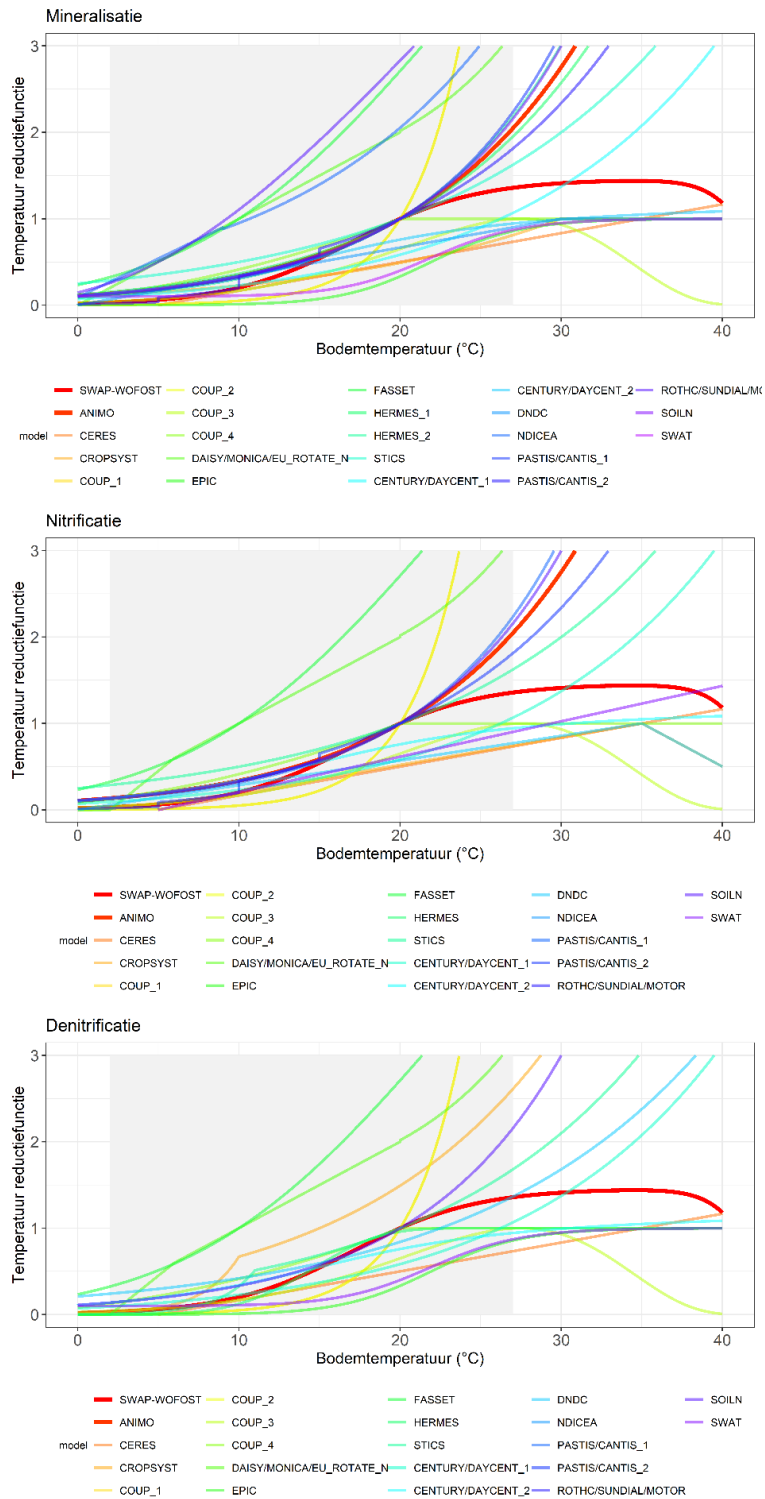
Veenlaag	Temperatuurrange	
	0 – 10.5 °C	10.5 – 19.5 °C
Bovengrond	4.03	2.68
Ondergrond	4.39	3.41



**Figuur 1** Temperatuurcorrectiefactor als functie van de temperatuur bij mineralisatie van Nederlandse veenmonsters onder laboratoriumomstandigheden (Bron: Vermeulen & Hendriks, 1996).

### B3.5 Grafische weergave reductiefuncties

De temperatuurreductiefuncties voor mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie, zoals hierboven gegeven, zijn in Figuur 2 grafisch weergegeven. Het is duidelijk dat er geen universele temperatuurcorrectie lijkt te bestaan: alle modellen hanteren eigen en onderling verschillende reductiefuncties. Deels komt het omdat niet alle modellen dezelfde referentietemperatuur gebruiken. Maar waarschijnlijk is de complexiteit van de meervoudige invloeden op de diverse bodemprocessen bepalend voor hoe de diverse modellen (modelleurs) hun temperatuurafhankelijkheid modelleren en parametriseren.



**Figuur 2** Grafische weergave van temperatuurafhankelijkheden voor de processen mineralisatie, nitrificatie en denitrificatie zoals benoemd in de bijbehorende paragrafen. Het grijs gearceerde gebied geeft de range aan van bodemtemperatuur zoals gemeten op de vier KNMI meetlocaties [2, 27°C] in de maanden april-oktober op de vijf meetdieptes.

## B3.6 Interactie reductiefuncties voor bodemwater en -temperatuur

In bovenstaand overzicht over hoe diverse bodemprocessen afhankelijk zijn van bodemtemperatuur werd ook duidelijk dat deze processen eveneens afhankelijk zijn van het watergehalte in de bodem.

Klimaatverandering betekent niet alleen verandering in temperatuur, maar ook in veranderingen van neerslag (patronen) en overige atmosferische omstandigheden (windsnelheid, luchtvochtigheid, straling). Dat heeft tevens tot gevolg dat er ook impact zal zijn op de toestand van het water in de bodem, en daarmee op de reductiefunctie voor bodemwater. Omdat het gedrag van beide type reductiefuncties verschillend is en het netto-effect in de meeste gevallen gelijk is aan het product van beide reductiefuncties, is op voorhand moeilijk in te schatten wat het uiteindelijke netto-effect zal zijn. Uiteraard wordt het nog complexer indien de processen daarnaast ook nog afhangen van pH en aëratie.

Als voorbeeld beschouwen we hier de gecombineerde reductie op basis van bodemvocht en bodemtemperatuur uit het COUP-model. De gecombineerde reductiefunctie is het product van de reductiefuncties voor temperatuur ( $f_T$ ) en bodemvocht ( $f_\theta$ ), gegeven door

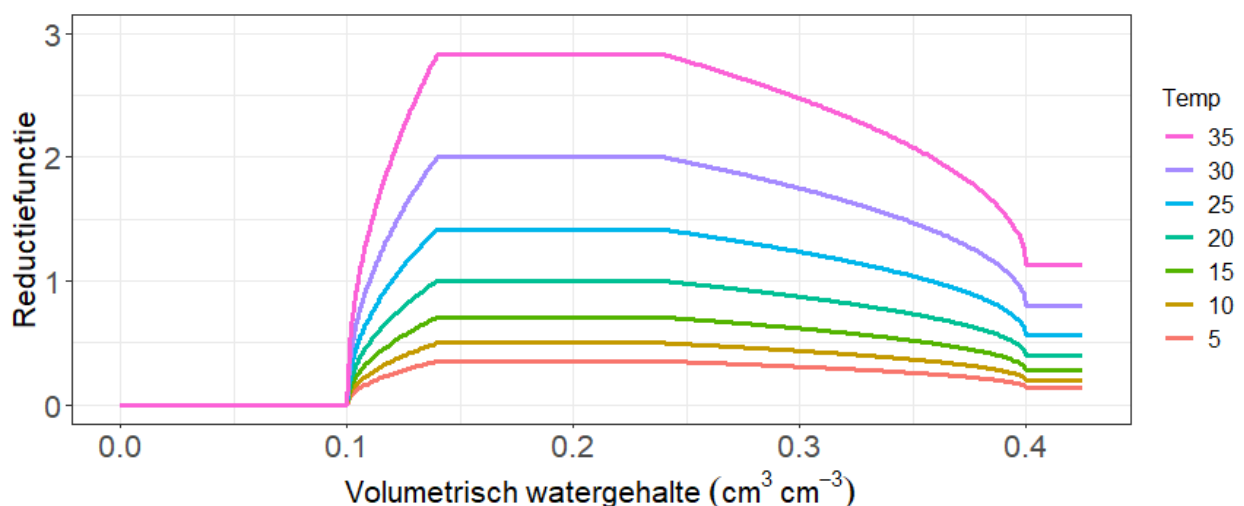
$$f_T = Q_{10}^{0.1(T-T_{ref})}$$

en

$$f_\theta = \begin{cases} 0 & \theta < \theta_{wp} \\ \min \left[ 1, \rho + (1 - \rho) \left( \frac{\theta_s - \theta}{\rho_{upper}} \right)^a, \left( \frac{\theta - \theta_{wp}}{\rho_{lower}} \right)^a \right] & \theta_{wp} \leq \theta < \theta_s \\ \rho & \theta = \theta_s \end{cases}$$

De temperatuurafhankelijkheid van deze gecombineerde reductiefunctie is gegeven in Figuur 3. De gebruikte parameterwaarden zijn:  $T_{ref} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_{10} = 2$ ,  $\theta_{wp} = 0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\theta_s = 0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\rho = 0.4$ ,  $\rho_{upper} = 0.16$ ,  $\rho_{lower} = 0.04$  en  $a = 0.5$ .

Bij toenemende temperatuur wordt de vorm bepaald door de afhankelijkheid van het bodemvocht ingedrukt voor  $T < T_{ref}$  en uitgerekt voor  $T > T_{ref}$ . Deze 'vervorming' is uiteraard niet-lineair, omdat de reductiefunctie voor temperatuur een niet-lineaire  $Q_{10}$ -relatie betreft. De temperatuur heeft in dit voorbeeld geen invloed op de watergehalten behorende bij de knikpunten in de  $f_\theta$ -relatie. Wel zien we dat de reductie nabij verzadiging minder wordt naarmate de temperatuur stijgt.



**Figuur 3** De gecombineerde reductiefunctie ( $f_T \cdot f_\theta$ ) als functie van volumetrisch watergehalte en bodemtemperatuur.



## B3.7 Decompositie, algemeen

In SWAP (Kroes et al., 2017) is het mogelijk om stoftransport te simuleren. Hierbij wordt afbraak (decompositie) berekend als functie van watergehalte en, indien gewenst, bodemtemperatuur. De temperatuurreductiefunctie is gegeven als

$$f_T = \begin{cases} \exp(\gamma(T - 20)) & T < 35 \\ \exp(15\gamma) & 35 \leq T \end{cases}$$

hierin is  $\gamma$  een reductieparameter ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; bijv. in de range 0-0.5).

## B3.8 Gewasopname en -groei

In het CropSyst-model wordt zelfs de N-opname door het gewas als functie van de bodemtemperatuur beschouwd. De andere beschouwde modellen hebben dat niet expliciet ingebouwd. Wel is het zo dat als gevolg van de klimaatverandering naast de temperatuur ook de  $\text{CO}_2$ -concentratie in de atmosfeer zal toenemen. Beide hebben effect op de groeisnelheid van het gewas (bijv. Kirschbaum, 2004). Verhoogde groeisnelheid betekent ook een grotere vraag naar bodemvocht om aan de transpiratievraag te kunnen voldoen en naar bodemstikstof voor N-opname.

In SWAP-WOFOST kan rekening gehouden worden met zaaien wat dan pas plaatsvindt wanneer op zaaidiepte de bodemtemperatuur een bepaalde grenswaarde heeft bereikt. Zo niet, dan wordt zaaien in het model uitgesteld. Grasgroei vindt pas plaats boven een bepaalde minimumtemperatuur die ofwel is gebaseerd op een gesommeerde luchttemperatuur ofwel op basis van de bodemtemperatuur.<sup>5</sup>

Model	Temperatuur afhankelijkheid
CROPSYST	De Michaelis-Menten opname is vermenigvuldigd met een T reductie functie $f(T_s) = \frac{2(T_s + 4)^2 (T_{opt} + 4)^2 - (T_s + 4)^4}{(T_{opt} + 4)^4}$
	bron: Stockle & Campbell, 1989

## B3.9 Gewas: zuurstofstress

In SWAP-WOFOST kan rekening gehouden worden met zuurstofstress die wortels kunnen ervaren in de bodem (Bartholomeus et al., 2008). Hierbij speelt zuurstofdiffusie een belangrijke rol, waarbij diverse aspecten afhankelijk zijn van de bodemtemperatuur. Dit zijn (NB T in K):

- de diffusiecoëfficiënt voor zuurstof in water:  $D_w(T) = D_{w,ref,293} \exp(0.026(T - 273))$
- de diffusiecoëfficiënt voor zuurstof in lucht:  $D_a(T) = 1.74528 \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3$
- de oppervlaktespanning van water:  $ST_w(T) = 0.07275(1 - 0.02(T - 291))$
- de Bunsen oploscoëfficiënt voor zuurstof:  
$$B(T) = 1413 \left( \exp\left(-144.397 + \frac{7775.18}{T} + 18.3977 \ln(T) + 0.0094437T\right) \right) \frac{273.15}{T}$$

<sup>5</sup> Dit refereert aan de grasgroeimodule die tot aan SWAP versie 4.1.80 is gebruikt. Op het moment van schrijven (mei 2021) wordt gewerkt aan implementatie van het grasgroeimodel LINGRA in SWAP. In LINGRA wordt start bladontwikkeling mede afhankelijk gezien op basis van de bodemtemperatuur: voor  $T < 3^{\circ}\text{C}$  geen bladontwikkeling, voor  $T > 8^{\circ}\text{C}$  geen beperking op bladontwikkeling, en lineair verlopende afhankelijkheid tussen 3 en  $8^{\circ}\text{C}$ .

- de microbiële respiratie wordt door een temperatuur reductie functie (en een vochtgehalte reductiefunctie; multiplicatief) aangepast:  $f(T) = Q_{10, \text{microbial}}^{0.1(T-298)}$
- wortelrespiratie:  $f(T) = Q_{10, \text{root}}^{0.1(T-298)}$

## B3.10 Literatuur

- Assinck, F.B.T. and C. Rappoldt. 2006. MOTOR 2.0: Module for transformation of organic matter and nutrients in soil. Alterra-report 933, Alterra, Wageningen, The Netherlands.
- Bartholomeus, R.P., J.P.M. Witte, P.M. van Bodegom, J.C. van Dam, and R. Aerts, 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *J. Hydrol.*, 360, 147-165.
- Bradbury, N.J., A.P. Whitmore, P.B.S. Hart and D.S. Jenkinson. 1993. Modelling the fate of nitrogen in crop and soil in the years following application of 15N-labelled fertilizer to winter wheat. *Journal of Agricultural Science* 121: 363-379.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309-332.
- Chatskikh, D., J.E. Olesen, J. Berntsen, K. Regina and S. Yamulki. 2005. Simulation of effects of soils, climate and management on N2O emission from grasslands. *Biogeochemistry* 76: 395-419.
- Coleman, K. & D.S. Jenkinson. 2014. RothC - A model for the turnover of carbon in soil. Model description and users guide. Rothamsted Research Harpenden Herts, AL5 2JQ, UK
- Garnier, P., Néel, C., Mary, B., and Lafolie, F. (2001). Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. *European Journal of Soil Science* 52: 253-268.
- Godwin D.C. and Singh U. 1998. Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. *In: Understanding Options for Agricultural Production* (G.Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P.K. Thornton, Eds.), p. 55-77. *System Approaches for Sustainable Agricultural Development*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London.
- Godwin D.C. and Jones C.A. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. *In Modeling Plant and Soil Systems* (J. Hanks and J.T. Ritchie, Eds.), p. 287-321. *Agronomy monograph no. 31*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wi.
- Groenendijk, P., H. Boogaard, M. Heinen, J. Kroes, I. Supit, A. de Wit. 2017. Simulation of nitrogen-limited crop growth with SWAP-WOFOST. Process descriptions and user manual. Report 2721, Wageningen Environmental Research, Wageningen, the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/400458>; see also: [swap.wur.nl](http://swap.wur.nl)
- Groenendijk, P., L.V. Renaud and J. Roelsma, 2005. Prediction of Nitrogen and Phosphorus leaching to groundwater and surface waters. Process descriptions of the ANIMO 4.0 model. Alterra-Report 983, Alterra, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/35121>
- Hansen, S., H.E. Jensen, N.E. Nielsen, H. Svendsen. 1990. DAISY – Soil Plant Atmosphere System Model. Report A10, The Royal Veterinary And Agricultural University, Miljøstyrelsen, Copenhagen, Denmark.
- Hénault, C. and J.C. Germon. 2000. NEMIS, a predictive model of denitrification on the field scale. *European Journal of Soil Science* 51: 257-270.
- Hendriks, R. 1991. Afbraak en mineralisatie van veen. Literatuuronderzoek. Rapport 199, DLO-Staring Centrum, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/304337>
- Johnsson, H., Bergström, L., and Jansson, P.E. (1987). Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 18: 333-356.
- Kersebaum, K.C. 1995. Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling* 81: 145-156.
- Kirschbaum, M.U.F. 2004. Direct and indirect climate change effects on photosynthesis and transpiration. *Plant Biology* 6(3): 242-253.
- 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>; see also: [swap.wur.nl](http://swap.wur.nl)

- 
- Li, C., Frolking, S., and Frolking, T.A. (1992). A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research* 97: 9759–9776.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2011) Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report Nr. 406. College Station, TX. Available from: <http://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf> (accessed December 23, 2019).
- Petersen, B.M., J. Berntsen, S. Hansen, L.S. Jensen. 2005. CN-SIM—a model for the turnover of soil organic matter. I. Long-term carbon and radiocarbon development. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 359–374.
- Rahn, C.R., Zhang, K., Lillywhite, R. et al. (2007) Brief Description of the EU-ROTATE\_N Model. The Integrated Model – Description of the Model Subroutines. University of Warwick. Available from: <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/lifesci/wcc/research/nutrition/eurotaten> (accessed December 23, 2019).
- Rahn, C.R., Zhang, K., Lillywhite, R. et al. (2010). EU-Rotate\_N – a decision support system – to predict environmental and economic consequences of the management of nitrogen fertiliser in crop rotations. *European Journal of Horticultural Science* 75: 20–32.
- Renaud, L.V., J. Roelsma, P. Groenendijk. 2005. ANIMO 4.0. User’s guide of the ANIMO 4.0 leaching model. Alterra–Report 224, Alterra, Wageningen. <http://www2.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/Alterraraapporten/AlterraRapport224.pdf>
- Salo, T. J., Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Angulo, C., Ewert, F., . . . Rötter, R. P. (2016). Comparing the performance of 11 crop simulation models in predicting yield response to nitrogen fertilization. *Journal of Agricultural Science*, 154(7), 1218-1240. doi:10.1017/S0021859615001124
- Sharpley, A.N., and J.R. Williams (eds.). 1990. EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768.
- Sierra, J. and L. Marban. 2000. Nitrogen Mineralization Pattern of an Oxisol of Guadeloupe, French West Indies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 2002–2010.
- Stockle, C.O., G.S. Campbell. 1989. Simulation of Crop Response to Water and Nitrogen: An Example Using Spring Wheat. *Trans ASAE* 32(1): 66-74.
- Van den Akker, J.J.H., J. Beuving, R.F.A. Hendriks & R.J. Wolleswinkel. 2007. Maaiveldddaling, afbraak en CO<sub>2</sub>-emissie van Nederlandse veenweidegebieden. Leidraad Bodembescherming, afl. 83, 5510: 1-30, SDU Uitgevers, Den Haag.
- Van der Burgt, G.J.H.M., Oomen, G.J.M., Habets, A.S.J., and Rossing, W.A.H. (2006). The NDICEA model, a tool to improve nitrogen use efficiency in cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74: 275–294.
- Vermeulen, J. & R.F.A. Hendriks. 1996. Bepaling van afbraaksnelheden van organische stof in laagveen. Ademhalingsmetingen aan ongestoorde veenmonsters in het laboratorium. Rapport 288, DLO-Staring Centrum, Wageningen. <https://edepot.wur.nl/303325>
- Yang H.S. 1996. Modelling organic matter mineralization and exploring options for organic matter management in arable farming in northern China. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.



---

Wageningen Environmental Research  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[wur.nl/environmental-research](http://wur.nl/environmental-research)

Wageningen Environmental Research  
Rapport 3154  
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, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten 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](http://wur.nl/environmental-research)

Rapport 3154  
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, 6.800 medewerkers (6.000 fte) en 12.900 studenten 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.

