



Verslag over de ontwikkeling van de temperatuur van de Maas over een periode van 20 jaar (1999-2019) op basis van de gegevens van het homogeen meetnet van de Internationale Maascommissie

Waarschuwing

We vestigen de aandacht van de lezer op de volgende punten

1/ Het verslag zelf is zeer technisch en niet noodzakelijk toegankelijk voor iedereen, maar de samenvatting maakt het mogelijk de belangrijkste conclusies te begrijpen.

2/ Het verslag beperkt zich tot de analyse van waargenomen temperatuurgegevens op de Maas in 2 meetstations in Wallonië en 2 stations verder stroomafwaarts (Nederland). De gegevens zijn beschikbaar bij de Waalse overheidsdienst SPW en Rijkswaterstaat.

3/ Deze resultaten zijn niet in perspectief geplaatst met de gegevens in de bibliografie over klimaatverandering en meer bepaald met de meest recente IPCC-rapporten (2022).

4/ De resultaten zijn lokaal en mogen niet worden geëxtrapoleerd naar de rest van de Maas en haar zijrivieren.

De gebruiker van alle elementen van het verslag of een deel ervan moet bij de publicatie de volgende bron vermelden: Internationale Maascommissie (Luik).



Verslag over de ontwikkeling van de temperatuur van de Maas over een periode van 20 jaar (1999-2019) op basis van de gegevens van het homogeen meetnet van de Internationale Maascommissie

Samenvatting

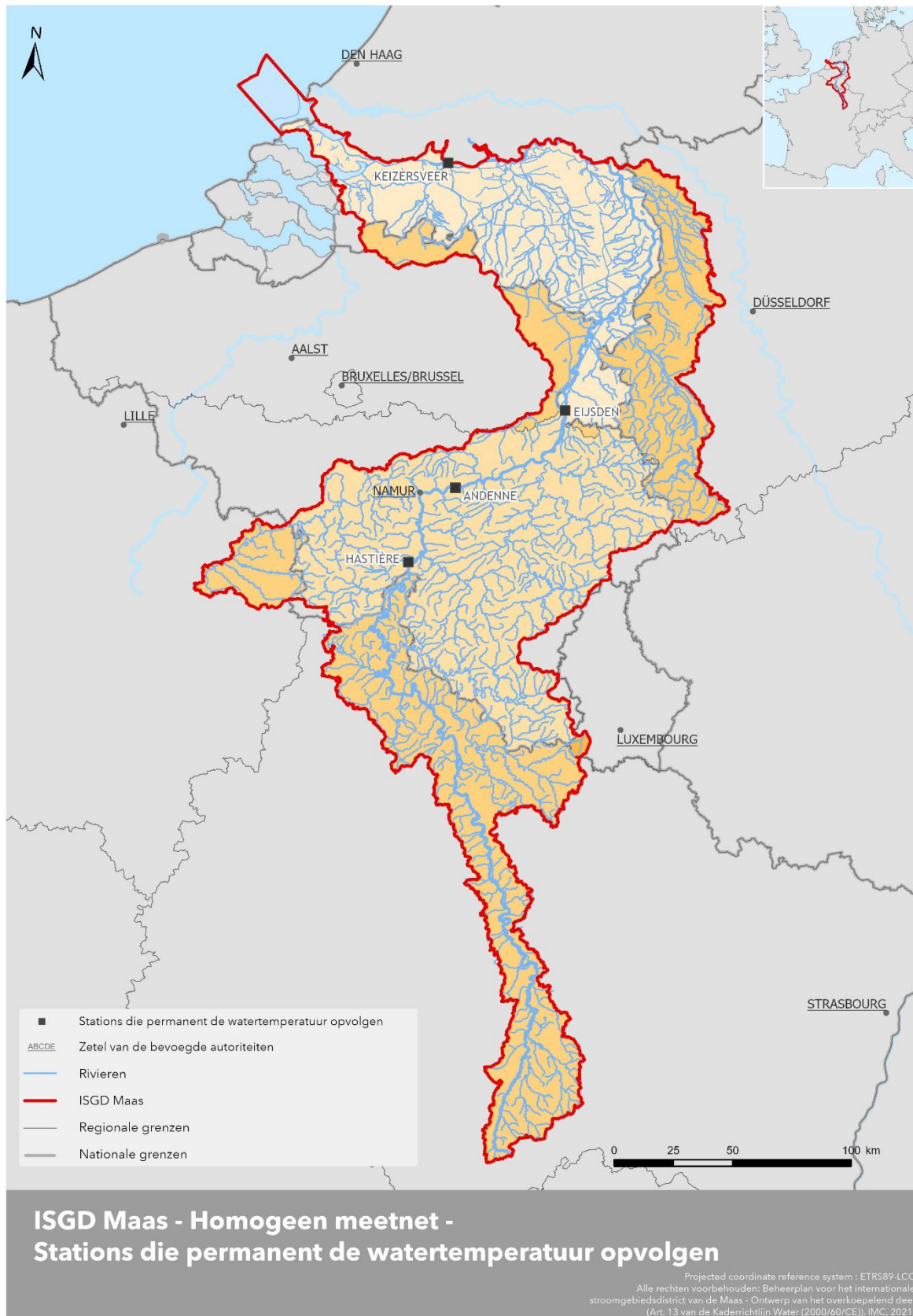
De ontwikkeling van de temperatuur van de Maas werd statistisch geanalyseerd voor de periode 1999-2019 op basis van continue meetgegevens van 4 stations, twee Waalse en twee Nederlandse. Uit de verkregen modelresultaten blijkt dat de temperatuur van de rivier in de betrokken periode aanzienlijk is gestegen, met bijna 1°C. Bovendien stijgt de temperatuur in het voorjaar aan het eind van de periode (2019) sneller dan aan het begin van de periode (1999), waarbij het maximum aan het eind van de periode hoger is, langer aanhoudt en vroeger in het jaar wordt bereikt dan aan het begin van de periode. Deze toename is zowel globaal als nationaal zichtbaar, met weinig variatie tussen stations en seizoenen. Er wordt een beknopte analyse gemaakt van het aantal dagen waarop de gemiddelde temperatuur van de Maas op tenminste één van de vier stations hoger ligt dan 25°C. Er is geen verschil in temperatuur tussen de landen. De thans beschikbare gegevens zijn nog ontoereikend om betrouwbare voorspellingen te doen voor de komende jaren. De toevoeging van nieuwe gegevens, waaronder Franse gegevens, zou het moeten mogelijk maken het betrouwbaarheidsinterval van de voorspellingen te verkleinen en de modellering in een later verslag te verfijnen.

Inleiding

Mandaat en achtergrond. Naar aanleiding van het besluit van de delegatieleiders van 28 juni 2013, waarbij de in document Maqua/13-15rev voorgestelde conclusies en acties inzake de verwerking van de temperatuur binnen de Internationale Maascommissie (IMC) werden goedgekeurd, kreeg de werkgroep Monitoring (WG M) van de IMC het mandaat om "bij te dragen aan de beoordeling van de monitoring van de gevolgen van de klimaatverandering, in samenwerking met WG R, WG A en WG H". Daartoe heeft hij als taak:

1. De resultaten van het monitoringnetwerk dat de ontwikkeling van de temperatuur van het water van de Maas opvolgt te verzamelen en uit te buiten aan de hand van de continue metingen in de monitoringstations waarvoor al verscheidene jaren resultaten beschikbaar zijn;
2. Een verslag te publiceren over de ontwikkeling van de temperatuur voor een eerste meetperiode van 20 jaar en vervolgens om de 10 jaar (Mmonitor 15-13 et 16-1def).

Doel van dit document. Een eerste verslag opstellen over de ontwikkeling van de temperatuur van de rivier over een periode van 20 jaar, op basis van vier stations (twee in Wallonië, twee in Nederland) die gedurende minstens een deel van de beschouwde periode, namelijk 1999-2019, zijn gecontroleerd. De zijrivieren van het stroomgebiedsdistrict van de Maas worden momenteel niet in aanmerking genomen.



Kaart 1: Homogeen meetnet - Stations die permanent de watertemperatuur opvolgen



Materiaal en methodes

Meetstations. De vier meetstations (kaart 1) zijn, van boven naar beneden: Hastière (X = 182309, Y = 98660, Lambert 72), Andenne (X = 199729, Y = 131480, Lambert 72) (Waalse stations), Eijsden ponton (N 50.8108 E 5.6949, GPS-coördinaten) en Keizersveer (N 51.7202 E 4.8944, GPS-coördinaten) (Nederlandse stations).

Meettoestellen, precisie, validatie.

- **Wallonië.** De continue temperatuurmeting wordt uitgevoerd via de temperatuursensor die is opgenomen in de pH-sonde (Temperatuursensoren: Pt 100) van het Aquapol-netwerk (netwerk voor continue meting van de fysisch-chemische kwaliteit van de Waalse rivieren). Voor de meetstations die ons aangaan, worden de sondes in de stations geplaatst en meten zij dus de temperatuur van het water dat in de waterloop wordt gepompt. De gegevens worden onderworpen aan een eerste automatische algoritmische validatie, vervolgens aan een handmatige validatie.

- **Nederland.** Watertemperatuurmetingen vinden plaats binnen het Landelijk Meetnet Water (LMW). Temperatuur wordt continue gemeten via een platina elektrode, dat in de rivier geplaatst is. Met een galvanometer wordt de weerstand van de draad gemeten, hetgeen een maat voor de temperatuur van het rivierwater is.

Zie: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/monitoring/gegevensinwinning/chemisch-fysisch/temperatuur/>

Beschikbare gegevens.

- **Wallonië.** Voor de twee Waalse stations strekt de meetperiode zich uit van 01/01/1999 tot 31/12/2019, met een frequentie van één gegeven om de 15 minuten. Aangezien een zo grote hoeveelheid informatie niet nodig is om een meerjarige ontwikkeling te belichten, werd op basis hiervan een daggemiddelde berekend (ruwe gegevens in tabel 1 beschikbaar op het secretariaat), hetgeen een verwacht totaal van 15340 gegevens voor de twee meetstations oplevert, d.w.z. 7670 verwachte gegevens per station, overeenkomend met het aantal dagen van de periode. Het aantal werkelijk beschikbare gegevens bedraagt 6895 in Hastière (89,9% van de verwachte gegevens) en 6470 in Andenne (84,3% van de verwachte gegevens). Door technische problemen zijn de metingen in de periode 1999-2019 verscheidene malen onderbroken, hetzij voor een van beide stations, hetzij voor beide stations tegelijk (in de oorspronkelijke tabellen aangegeven met alle waarden = 0 of, voor 3 data in Hastière, met een volledig blanco regel). Deze onderbrekingsperioden komen overeen met 775 dagen onderbreking zonder metingen in Hastière en 1161 dagen onderbreking zonder metingen in Andenne, d.w.z. in totaal 1200 dagen met ontbrekende metingen in ten minste één van beide stations.

- **Nederland.** Voor de twee Nederlandse stations strekt de meetperiode zich uit van 14/01/2013 in Eijsden en van 21/01/2013 in Keizersveer tot 31/12/2019, met een snelheid van één gegeven per seconde, gemiddeld om de 10 minuten. Aangezien een dergelijke grote hoeveelheid informatie niet nodig is om een meerjarige ontwikkeling te laten zien, werd op basis hiervan

een daggemiddelde berekend (tabel 1 beschikbaar op het secretariaat), hetgeen 2538 gegevens opleverde in Eijsden en 2535 in Keizersveer.

Verbetering van de Waalse gegevens. Als we een grafiek tekenen van de jaarlijkse gemiddelde temperatuur (berekend op basis van deze daggemiddelden) in functie van het jaar om een mogelijke ontwikkeling te visualiseren, zien we onmiddellijk belangrijke dalingen van de jaargemiddelden in Hastière in 2011-2012 en in Andenne in 2014-2015 (Fig. 1). Deze dalingen zijn artefacten, die verband houden met de talrijke ontbrekende gegevens (vervangen door de waarde 0) voor deze twee stations gedurende de periodes in kwestie.

Als men het jaargemiddelde van de temperatuur (berekend op basis van deze daggemiddelden) uitzet tegen het jaar om een eventuele ontwikkeling te visualiseren, stelt men onmiddellijk aanzienlijke dalingen vast van de jaargemiddelden in Hastière in 2011-2012 en in Andenne in 2014-2015 (Fig. 1). Deze dalingen zijn artefacten, die verband houden met de talrijke ontbrekende gegevens (vervangen door de waarde 0) voor deze twee stations gedurende de periodes in kwestie.

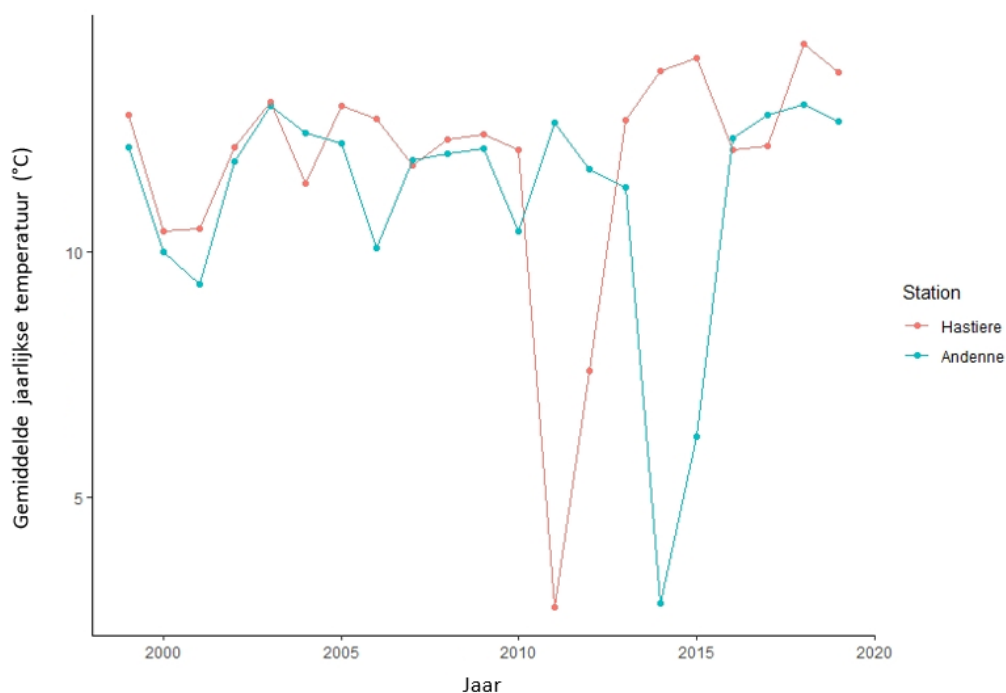


Fig. 1. Gemiddelde jaarlijkse temperatuur van de twee Waalse stations voor de periode 1999-2019: ruwe gegevens.

Aangezien ervan wordt uitgegaan dat de in Hastière en in Andenne opgemeten temperaturen op vrij vergelijkbare wijze variëren, zal elk ontbrekend gegeven op een Waals station worden vervangen door de waarde die op dezelfde dag op het andere station is waargenomen, wanneer deze waarde beschikbaar is.

In totaal zijn er dus 116 dagen zonder temperatuurgegevens, aangezien geen van de twee Waalse stations op de betrokken datum over temperatuurgegevens beschikte. Aangezien de ontbrekende gegevens over korte perioden zijn verspreid (van 1 tot 12 opeenvolgende dagen),

werd een progressief gewogen gemiddelde gegenereerd op basis van de bestaande gegevens rond de ontbrekende periode.

Als op basis van de gewijzigde gegevens een nieuwe grafiek van de gemiddelde jaarlijkse temperatuur versus het jaar wordt gemaakt, krijgt men het resultaat op fig. 2.

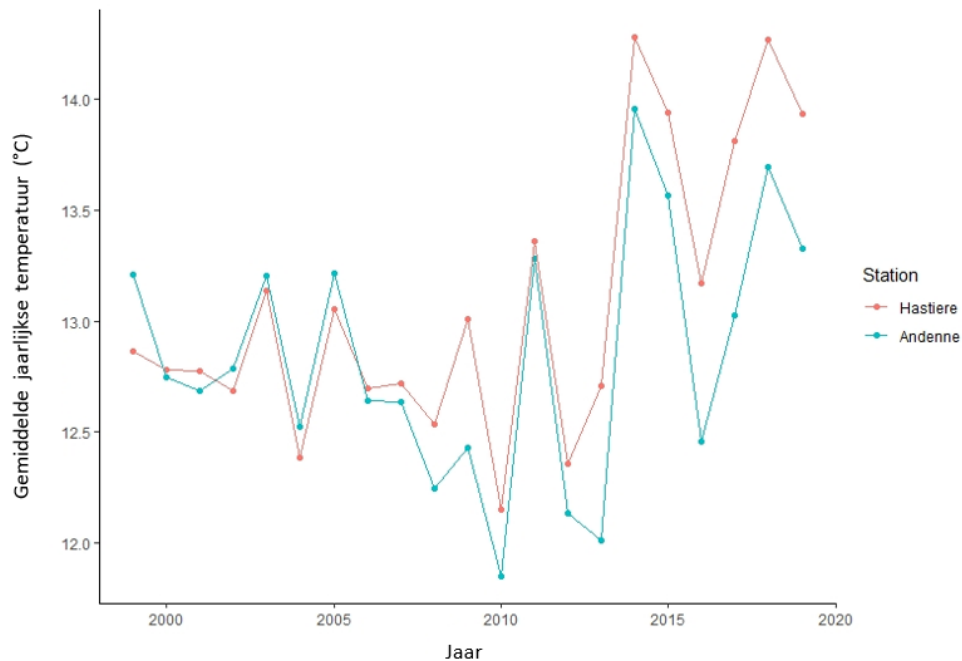


Fig. 2. Gemiddelde jaarlijkse temperatuur van twee Waalse stations voor de periode 1999-2019: gewijzigde gegevens.

Gebruikte statistische methoden.

De syntheses van de gegevens en de berekeningen werden met behulp van de software R uitgevoerd door Dr. A. Latli, verbonden aan de Directie Natuur en Water (DEMNA, DGARNE) van de Waalse Overheidsdienst bij het schrijven van dit verslag.

De gegevens zullen worden samengevat in de vorm van jaargemiddelden per station (d.w.z. in totaal 56 waarden voor de 4 stations in de 2 landen, tabel 2 beschikbaar op het secretariaat) en maandgemiddelden per station (d.w.z. in totaal 672 waarden voor de 4 stations in de 2 landen, 168 voor Nederland en 504 voor Wallonië, tabel 3 beschikbaar op het secretariaat).

Een Loess-regressie zal worden toegepast op de jaarlijkse gemiddelden per station. De Loess-regressie (pakket "stats" in R) is een niet-parametrische methode voor het produceren van plaatselijk aangepaste en afgevlakte krommen voor een puntenwolk met behulp van een opeenvolging van polynomen van graad 2, een "buurt"-parameter α (met een standaardwaarde van 0,75) tussen een punt op de kromme en de meest naburige punten in de wolk en een parameter P voor de weging van hetzelfde punt op de kromme.

De maandelijkse gemiddelde temperaturen per station zullen worden gemodelleerd met behulp van gegeneraliseerde additieve mengmodellen (GAMM) ("mgcv"-pakket van R). Een



gegeneraliseerd additief model (GAM) is een statistisch model dat de eigenschappen van het gegeneraliseerd lineair model (GLM, een generalisatie van lineaire regressie) samenvoegt met die van het additief model, gebaseerd op de som van de verschillende verklarende variabelen (vandaar de term additief). Een gegeneraliseerd additief gemengd model combineert de eigenschappen van een GAM met die van een gemengd model (zelf een combinatie van vaste en willekeurige effecten). Deze aanpak wordt vaak gebruikt om trends in abiotische of biotische parameters te modelleren (Zuur en al. 2009).

De GAMM's zullen eerst worden geconstrueerd met behulp van een zogenaamd naïef model, d.w.z. zonder rekening te houden met de mogelijke autocorrelatie van de gegevens (d.w.z. de invloed van de temperatuur van één dag op de temperatuur die op de volgende dagen wordt gemeten). Dit zal vervolgens worden verbeterd door een argument toe te voegen ("`corStruct`" uit het "`lme`"-pakket in R) dat gericht is op het kwantificeren en verminderen van de vertekeningen die verband houden met de autocorrelatie binnen een jaar die in de gegevens zijn opgenomen. Aangezien verschillende modellen de autocorrelatie die hieruit kan voortvloeien in meer of mindere mate kunnen verminderen, zal de keuze van het meest relevante model worden gemaakt via een ANOVA door de "gain of adjustment" (AIC) tussen de modellen te testen (Wood 2004, 2006a en 2006b). De resultaten van de analyse zijn opgenomen in de tabellen 4-6 beschikbaar op het secretariaat. Alleen die welke betrekking hebben op het voorkeursmodel (vetjes gedrukt in de eerdergenoemde tabellen 4-6) zullen hieronder worden gepresenteerd en besproken.

De gegevens zullen achtereenvolgens worden geanalyseerd voor Wallonië alleen, voor Nederland alleen en vervolgens voor de 4 stations in beide landen, waarbij dezelfde methoden zullen worden gebruikt. De ontwikkeling van de jaarlijkse minimum- en maximumtemperaturen voor alle stations en per station zal ook grafisch worden samengevat en het aantal dagen dat een drempelwaarde (25°C) wordt overschreden, zal worden vermeld.

Resultaten

Waalse gegevens

Jaargemiddelden per station

Wanneer een Loess-regressie wordt toegepast op de grafiek van de gemiddelde jaartemperatuur ten opzichte van het jaar op basis van de geconsolideerde gegevens in Fig. 2, verkrijgt men de grafiek van Fig. 3. De curves lijken, na een lichte daling tussen 2005 en 2010, een vrij duidelijke stijging van de temperatuur te vertonen, vooral in Hastière, zonder dat het in dit stadium mogelijk is er verdere informatie uit af te leiden.

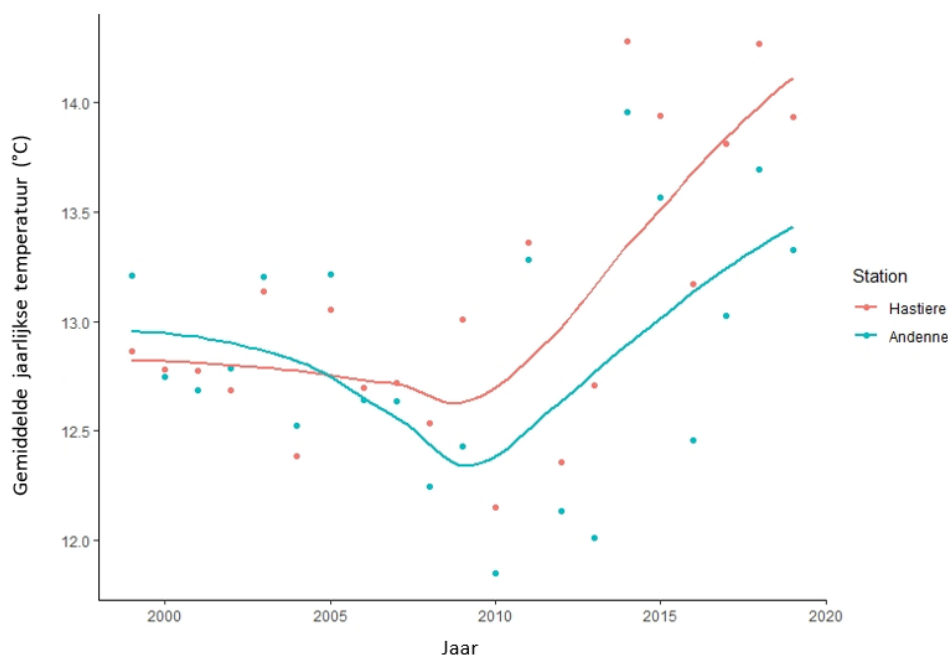


Fig. 3. Gemiddelde jaarlijkse temperatuur van de twee Waalse stations voor de periode 1999-2019: Loess-regressie.

Maandelijks gemiddelden per station

Om de beschikbare gegevens meer in detail te kunnen analyseren, wordt een gegeneraliseerd additief gemengd model toegepast op de maandelijks temperatuurgemiddelden. Het houdt rekening met (1) het "maand van het jaar"-effect (aangezien de gemiddelde temperatuur natuurlijk varieert over de maanden) ("s(Maand)" in R), (2) het mogelijke effect van het station ("Station") en (3) het effect van de temporele ontwikkeling ("s(Tijd)" in R), dat het gevolg zou kunnen zijn van de klimaatverandering. Het model is zo gekozen dat de autocorrelatie van de gegevens zo klein mogelijk is (tabel 4 beschikbaar op het secretariaat).

Het voorkeursmodel toegepast op de 504 maandelijks gemiddelden voor de twee Waalse stations is:

$$\text{Gemiddelde } T \sim s(\text{Maand}, \text{bs} = "cc", k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Station})$$

De verkregen resultaten zijn:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	13,05	0,11	123,46	< 0,001
Station	-0,26	0,15	-1,81	0,07
R ² adjusted	0,956			

	Edf	Ref.df	F	p-value
s(Mois)	9,30	10,000	721,92	< 0,001
s(Time)	2,45	2,47	8,66	< 0,001

De grafiek van de voorspelde temperaturen in de loop van een jaar is te zien in Fig. 4, en de grafiek van de temperaturen over de periode 1999-2019 in Fig. 5. Deze laatste geeft een temperatuurstijging van ruim 0,5°C aan tussen 1999 en 2019.

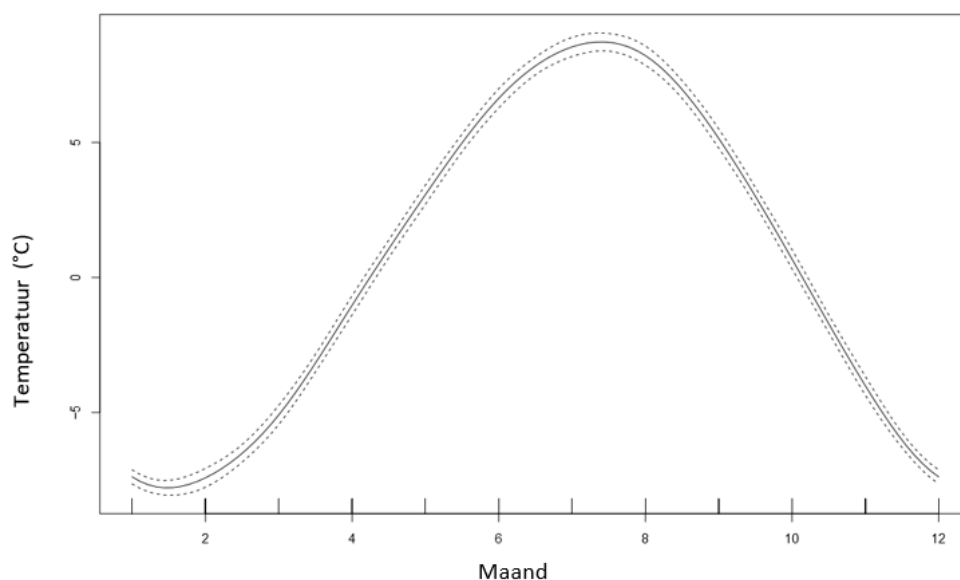


Fig. 4. De jaarschommeling van gereduceerde gecentreerde gemiddelde temperaturen (°C) gemodelleerd via een GAM voor de twee Waalse stations gedurende de periode 1999-2019). De standaardafwijking is aangegeven met een stippellijn.

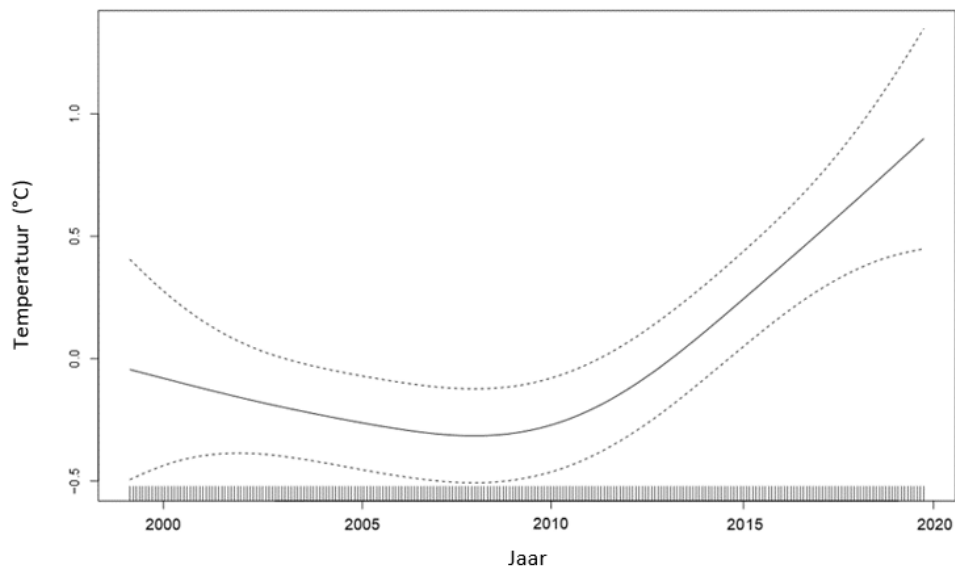


Fig. 5. Ontwikkeling van de gemiddelde gecentreerde temperaturen (°C) gemodelleerd via een GAM voor de twee Waalse stations gedurende de periode 1999-2019. De standaardafwijking is aangegeven met een stippellijn.

Uit de resultaten in bovenstaande tabel blijkt dat

- (1) het model relevant is ($R^2 = 0,956$),
- (2) er geen statistisch significant verschil is tussen de Waalse stations wat de temperatuursontwikkeling betreft ($p = 0,07$),
- (3) het maandeffect statistisch zeer significant is ($p < 0,001$), wat verwacht was, evenals het tijdseffect ($p < 0,001$), dat duidelijk positief is,
- (4) de residuele autocorrelatie is zeer beperkt.

Om de ontwikkeling van de maandtemperatuur over de hele periode 1999-2019 te analyseren en voorspellingen te doen, wordt een nieuwe GAM gegenereerd door het gemiddelde te nemen van de maandtemperaturen van de twee Waalse stations (aangepaste R^2 van 0,956).

Door de voorspelde temperaturen voor elke maand van het jaar gedurende twee jaar aan het eind van de beschouwde periode op dezelfde grafiek te plaatsen, ontstaat de eerste grafiek van fig. 6. Aangezien de beschouwde periode kort is, overlappen de betrouwbaarheidsintervallen elkaar. Het is niettemin duidelijk dat de riviertemperatuur in 2018 in het voorjaar sneller stijgt dan in 1999 en dat het maximum in 2018 ook hoger is, vroeger wordt bereikt (in juli in plaats van in augustus) en langer aanhoudt, met iets lagere winterminima die naar februari lijken te verschuiven. Vervolgens wordt getracht een modellering te maken voor de periode 2000-2030.

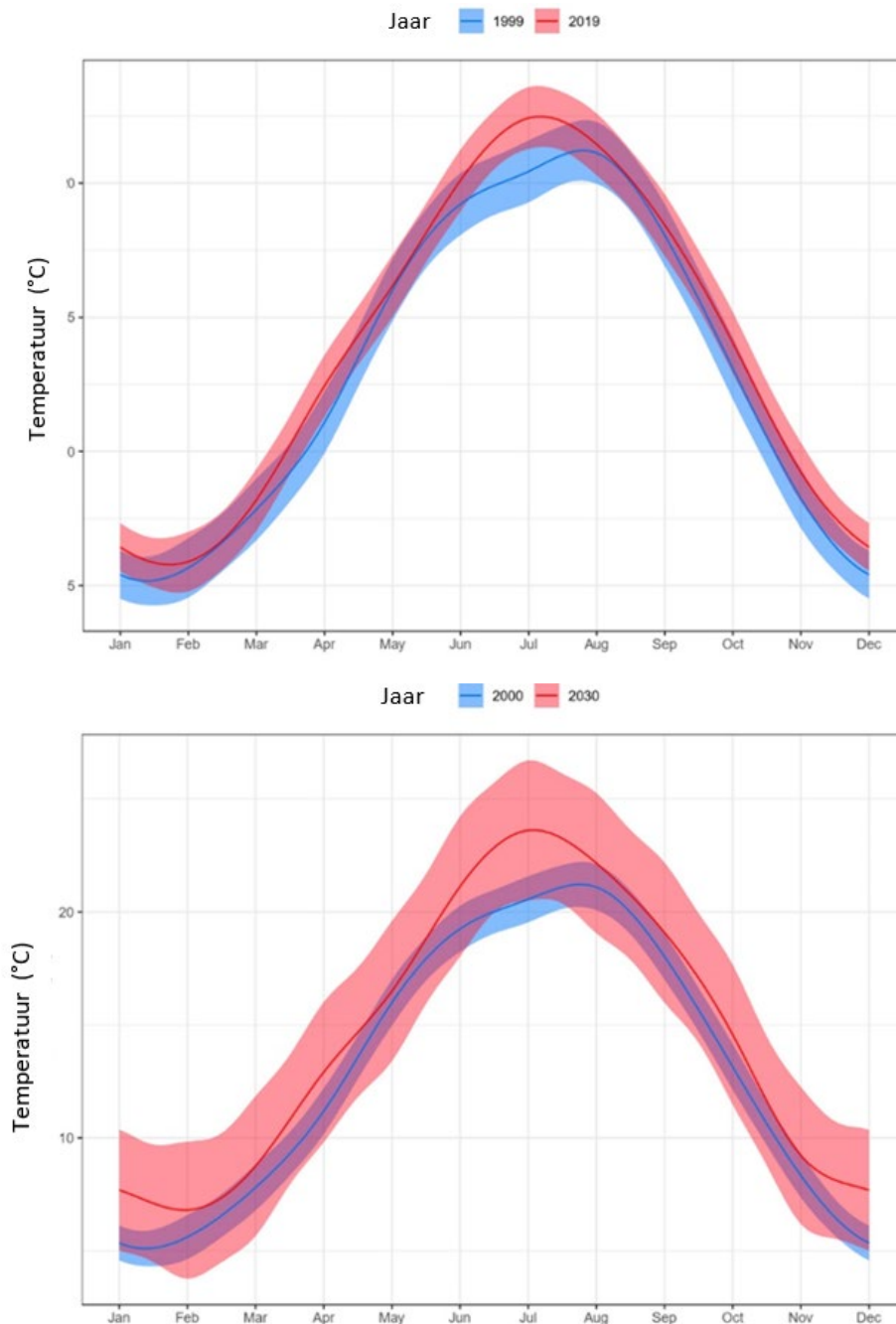


Fig. 6. Jaarschommeling van de gemodelleerde gemiddelde temperaturen voor beide Waalse stations, voor de referentiejaren 1999/2019 et 2000/2030. De standaardafwijking wordt weergegeven in gekleurde stroken.

Aangezien hetzelfde model gemiddelde maandelijkse temperatuurvoorspellingen kan geven voor elk jaar van de beschouwde periode, is het mogelijk de voorspellingen maandelijks of per seizoen voor de gehele periode te presenteren. Deze laatste presentatie is zeer informatief en wordt weergegeven in Fig. 7.

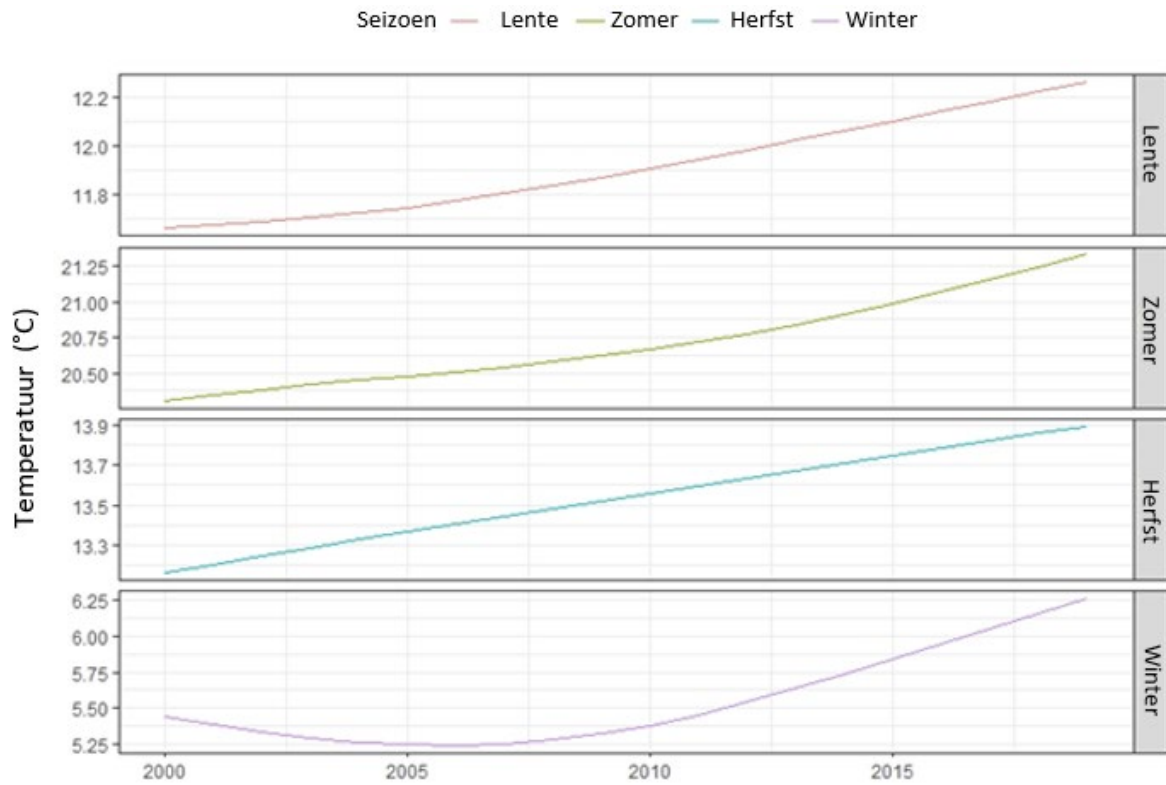


Fig. 7. Ontwikkeling van de gemodelleerde gemiddelde temperaturen per seizoen voor de twee Waalse stations gedurende het jaar, tijdens de referentiejaar 1999/2019.

Nederlandse gegevens

De Nederlandse gegevens worden volgens dezelfde methode verwerkt als de Waalse, met dien verstande dat het tijdsinterval aanzienlijk korter is, hetgeen de kwaliteit en de nauwkeurigheid van de modellering gedeeltelijk kan verminderen.

Jaarlijkse gemiddelden per station

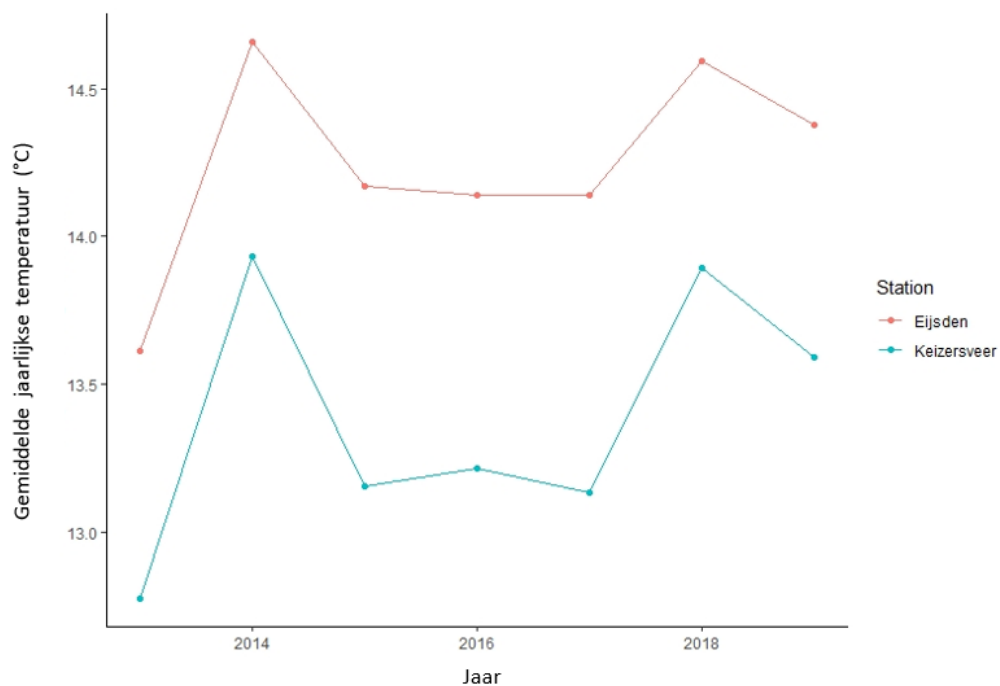


Fig. 8. Jaarlijkse gemiddelde temperatuur van twee Nederlandse stations voor de periode 2013-2019.

Als een Loess-regressie wordt toegepast op de grafiek van de gemiddelde jaartemperatuur versus het jaar van Fig. 8, verkrijgt men de grafiek van Fig. 9.

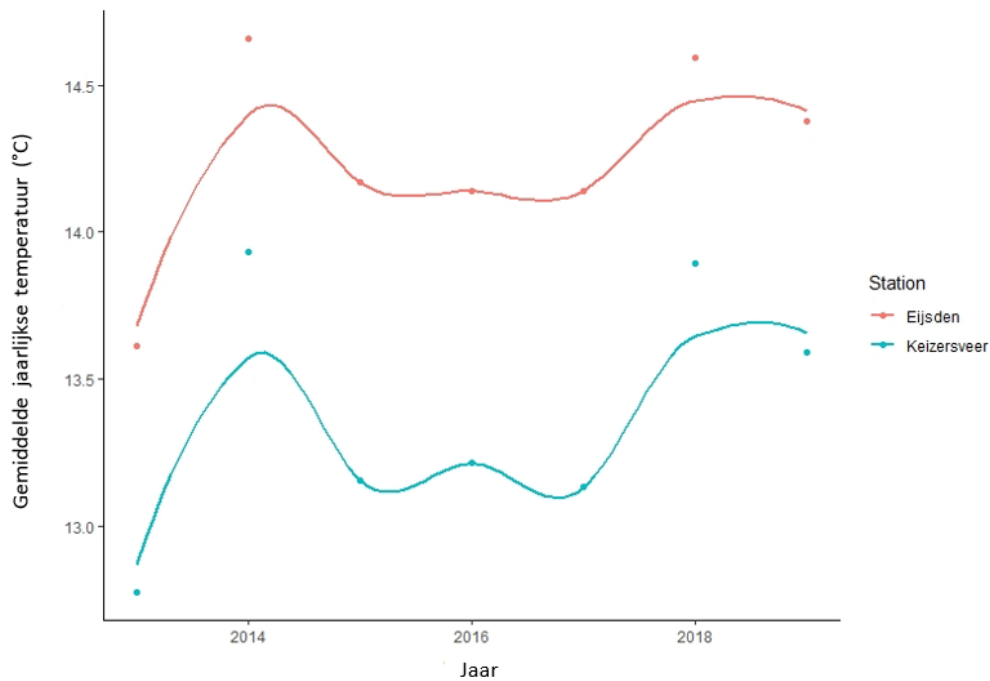


Fig. 9. Jaarlijkse gemiddelde temperatuur van twee Nederlandse stations voor de periode 2013-2019. Loess-regressie.

Maandelijks gemiddelden per station

Het voorkeursmodel (bijlage 3 beschikbaar op het secretariaat) toegepast op de 168 maandelijks gemiddelden voor de twee Nederlandse stations is:

$$\text{Gemiddelde } T \sim s(\text{Maand}, \text{bs} = \text{"cc"}, k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Station})$$

De verkregen resultaten zijn:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	14,20	0,16	89,14	< 0,001
Station	-0,98	0,22	-4,49	< 0,001
R ² adjusted	0,96			

	Edf	Ref.df	F	p-value
s(Mois)	8,81	10,000	313,65	< 0,001
s(Time)	5,29	3,85	4,75	0,0016

De grafiek van de voorspelde temperaturen in de loop van een jaar wordt getoond in Fig. 10, de grafiek van de temperaturen over de periode 2013-2019 in Fig. 11

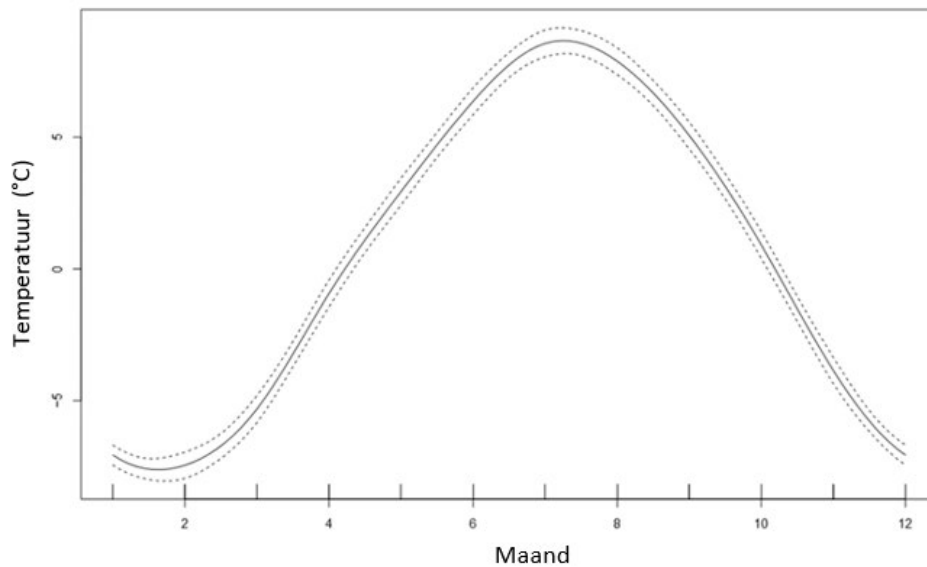


Fig. 10. Jaarschommeling van gereduceerde gecentreerde gemiddelde temperaturen (°C) gemodelleerd via een GAM voor de twee Nederlandse stations over de periode 2013-2019. De standaardafwijking is aangegeven met een stippellijn.

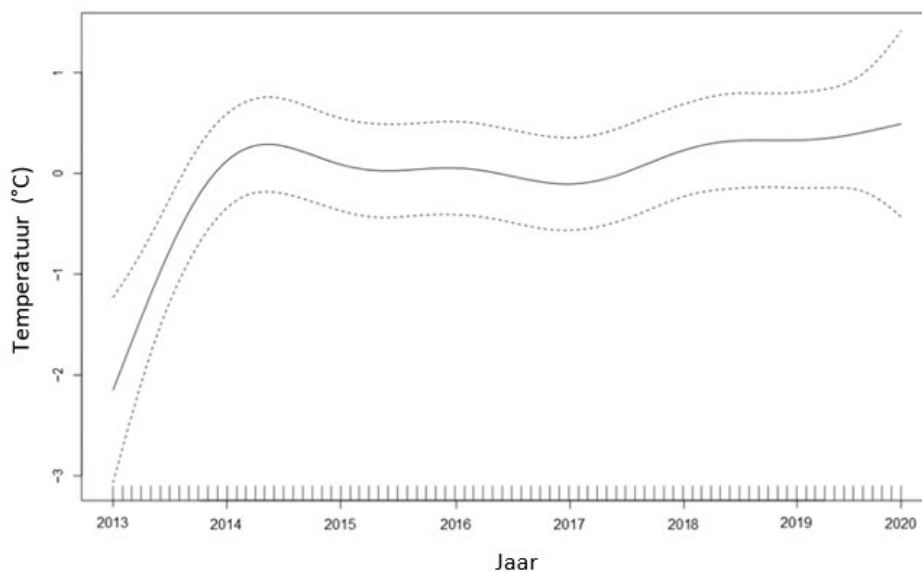


Fig. 11. Ontwikkeling van de gereduceerde gecentreerde gemiddelde temperaturen (°C) gemodelleerd via een GAM voor de twee Nederlandse stations gedurende de periode 2013-2019. De standaardafwijking is aangegeven met een stippellijn.



Uit de verkregen resultaten die in bovenstaande tabel staan en die een sterke gelijkenis vertonen met de Waalse resultaten, blijkt dat:

- (1) het model relevant is ($R^2 = 0,96$),
- (2) er een significant verschil is tussen de Nederlandse stations wat de temperatuursontwikkeling betreft ($p = 1,39e-5$),
- (3) het maandeffect statistisch gezien zeer significant is ($p < 0,001$), wat verwacht was, evenals het tijdseffect ($p = 0,0016$), dat duidelijk positief is,
- (4) de residuele autocorrelatie is zeer beperkt.

Om de maandelijkse temperatuursontwikkeling over de gehele periode 2013-2019 te analyseren, wordt een nieuwe GAM gegenereerd door het gemiddelde te nemen van de maandelijkse temperaturen van de twee Nederlandse stations.

Door de voor elke maand van het jaar voorspelde temperaturen gedurende twee jaar aan het einde van de beschouwde periode op dezelfde grafiek te plaatsen, verkrijgt men de eerste grafiek van Fig. 12, vervolgens wordt een modellering getest voor de periode 2015-2025..

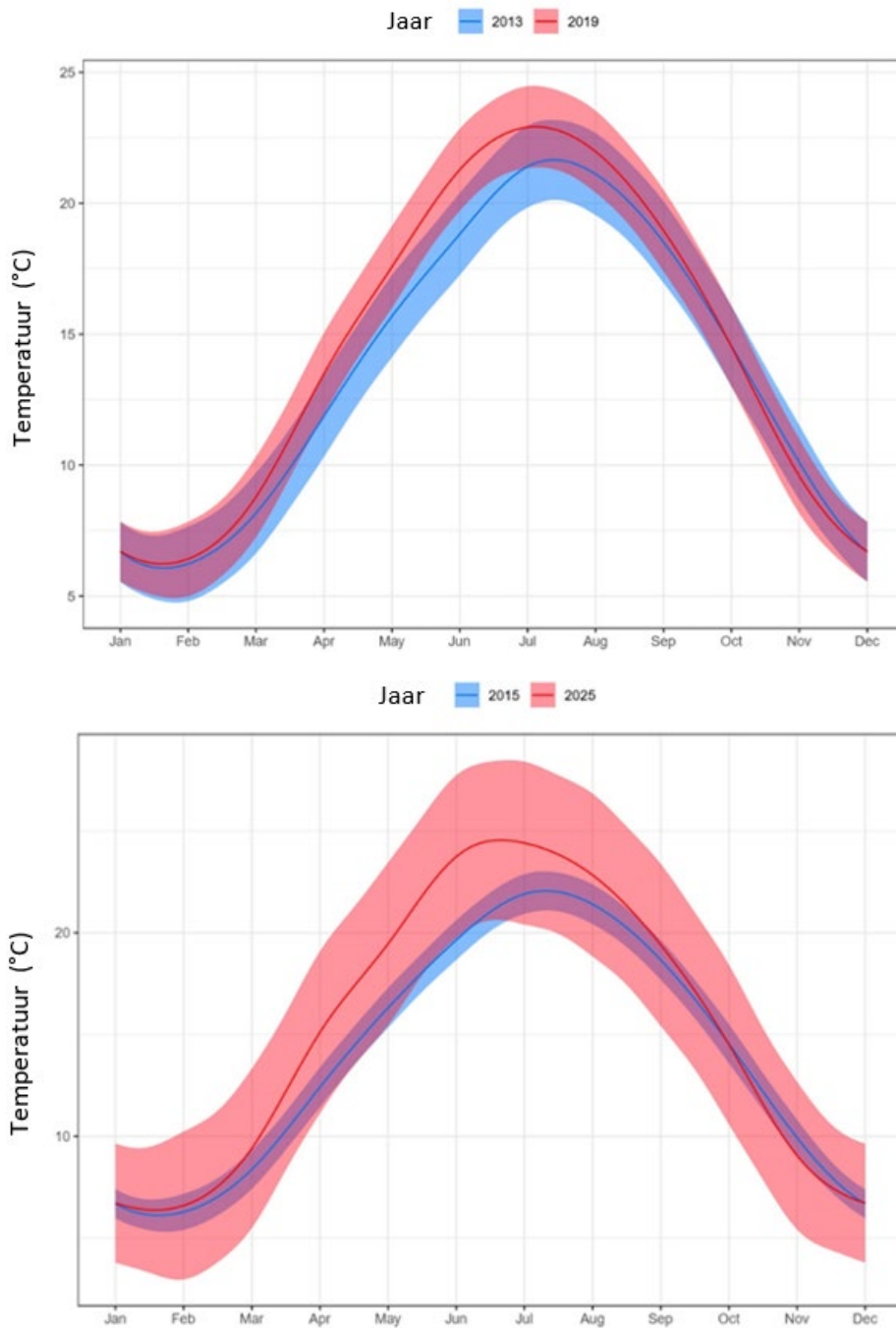


Fig. 12. Jaarschommeling van de gemiddelde gemodelleerde temperaturen voor de twee Nederlandse stations, voor de referentiejaar 2013/2019 en 2015/2025. De standaardafwijking wordt weergegeven in gekleurde stroken.

Aangezien de beschouwde periode kort is, overlappen de betrouwbaarheidsintervallen elkaar. Uit fig. 12 blijkt echter opnieuw duidelijk dat de riviertemperatuur in 2019 in het voorjaar sneller stijgt dan in 2013 en dat het maximum in 2019 ook hoger is, vroeger wordt bereikt (rond begin juli in plaats van midden juli) en langer aanhoudt.

Aangezien hetzelfde model gemiddelde maandelijkse voorspellingen van de temperatuur kan geven voor elk jaar van de beschouwde periode, is het mogelijk de voorspellingen maandelijks of per seizoen voor de gehele periode te presenteren. Deze laatste presentatie is te zien in fig. 13.

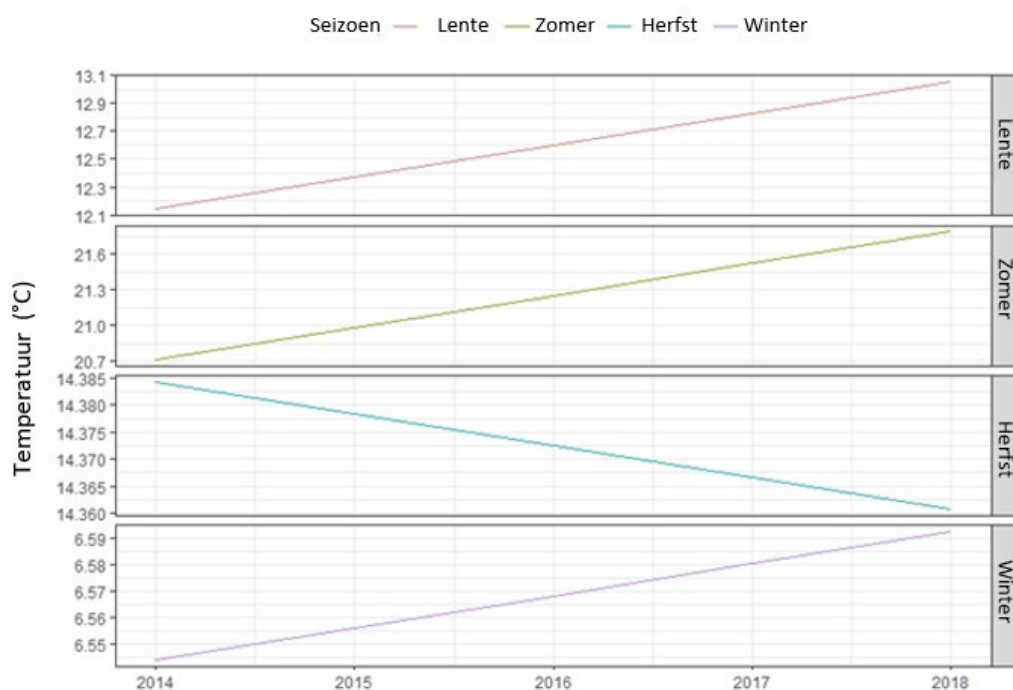


Fig. 13. Ontwikkeling van de gemiddelde gemodelleerde temperaturen per seizoen voor de twee Nederlandse stations in de loop van het jaar, in de referentiejaren 2014/2018.

Globale analyse van alle gegevens

De gegevens van de 4 stations in de 2 landen worden samen geanalyseerd volgens dezelfde methodes als hierboven beschreven.

Jaargemiddelden per station

Fig. 14 toont de ontwikkeling van de gemiddelde jaarlijkse temperatuur voor alle stations, waarbij het station van Eijsden er duidelijk uitspringt.

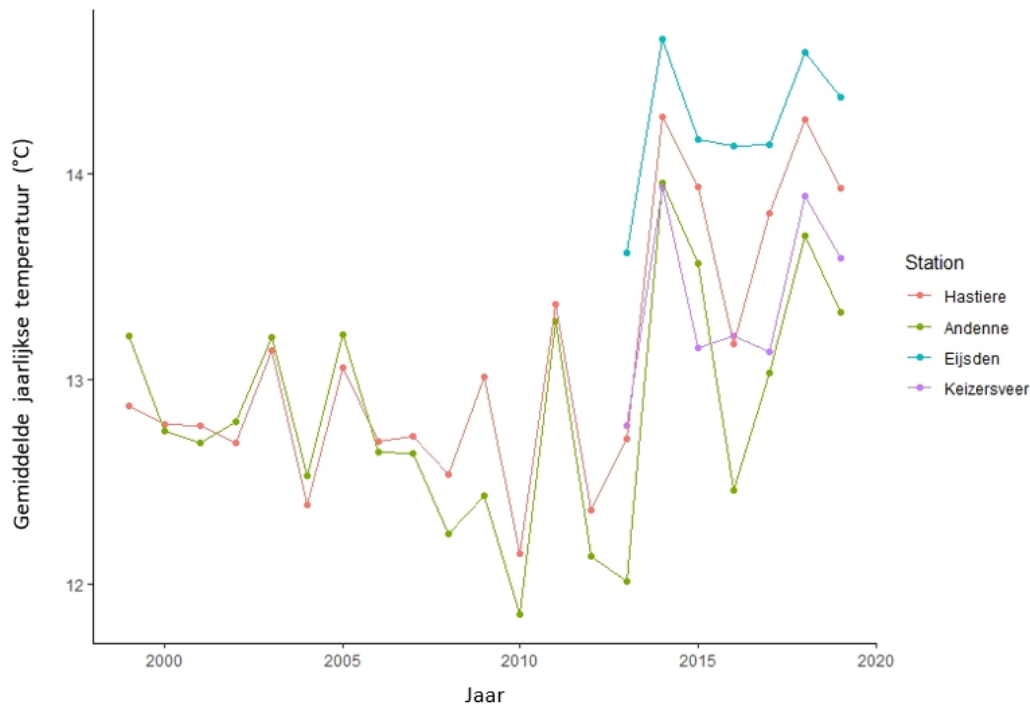


Fig. 14. Gemiddelde jaarlijkse temperatuur van de vier geanalyseerde Waalse en Nederlandse stations, voor de periode 1999-2019.

Maandelijkse gemiddelden per station

Net zoals hierboven, wordt een algemeen additief model toegepast op de maandelijkse gemiddelden, waarbij rekening wordt gehouden met het maandeffect, het jaareffect (indien aanwezig) en het landeffect (indien aanwezig).

Gemiddelde $T \sim s(\text{Maand}, \text{bs} = \text{"cc"}, k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Land})$

De verkregen resultaten zijn :

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
Intercept	13,03	0,082	158,98	< 0,001
Pays	0,34	0,18	1.87	0,06
R ² adjusted	0,96			

	Edf	Ref.df	F	p-value
s(Mois)	9,48	10,0	920,5	< 0,001
s(Time)	2,66	2,66	10,70	< 0,001

We moeten erop wijzen dat ondanks de hogere temperatuurwaarden die in Eijsden zijn waargenomen, het "land"-effect statistisch niet significant is ($p=0,06$). Anderzijds is het model, net als bij de vorige modellering, zeer significant ($R^2=0,96$). Het maandeffect is goed merkbaar en vooral de gemiddelde temperatuur in de bestudeerde periode is zeer sterk gestegen ($p<0,001$).

De grafiek van de gemodelleerde temperaturen in de loop van een jaar is te zien in Fig. 15, die van de temperaturen over de periode 1999-2019 in Fig. 16.

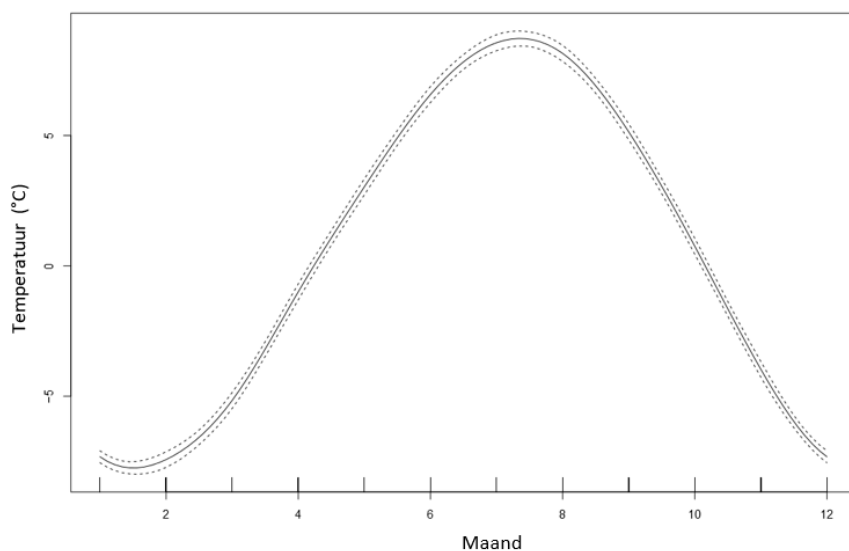


Fig. 15. Jaarschommeling van gereduceerde gecentreerde gemiddelde temperaturen (°C) gemodelleerd via een GAM van de Belgische en Nederlandse Maas gedurende de periode 1999-2019). De standaardafwijking is aangegeven met een stippellijn.

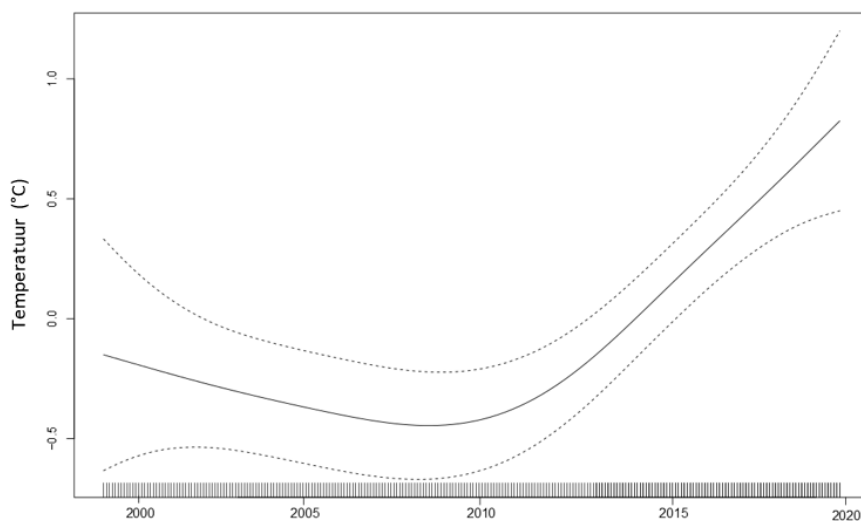


Fig. 16. Ontwikkeling van de gemiddelde gecentreerde temperaturen (°C) gemodelleerd via een GAM van de Belgische en Nederlandse Maas gedurende de periode 1999-2019. De standaardafwijking wordt aangegeven met stippellijnen. Merk op dat de integratie van de Nederlandse gegevens het mogelijk maakt dit interval voor recente periodes te verkleinen (vergelijk met Fig. 5)

Als we de door het vorige model voorspelde temperaturen voor elke maand van het jaar gedurende twee jaar aan het eind van de beschouwde periode op dezelfde grafiek plaatsen,

verkrijgt men de eerste grafiek van Fig. 17, vervolgens wordt een modellering getest voor de periode 2000-2030.

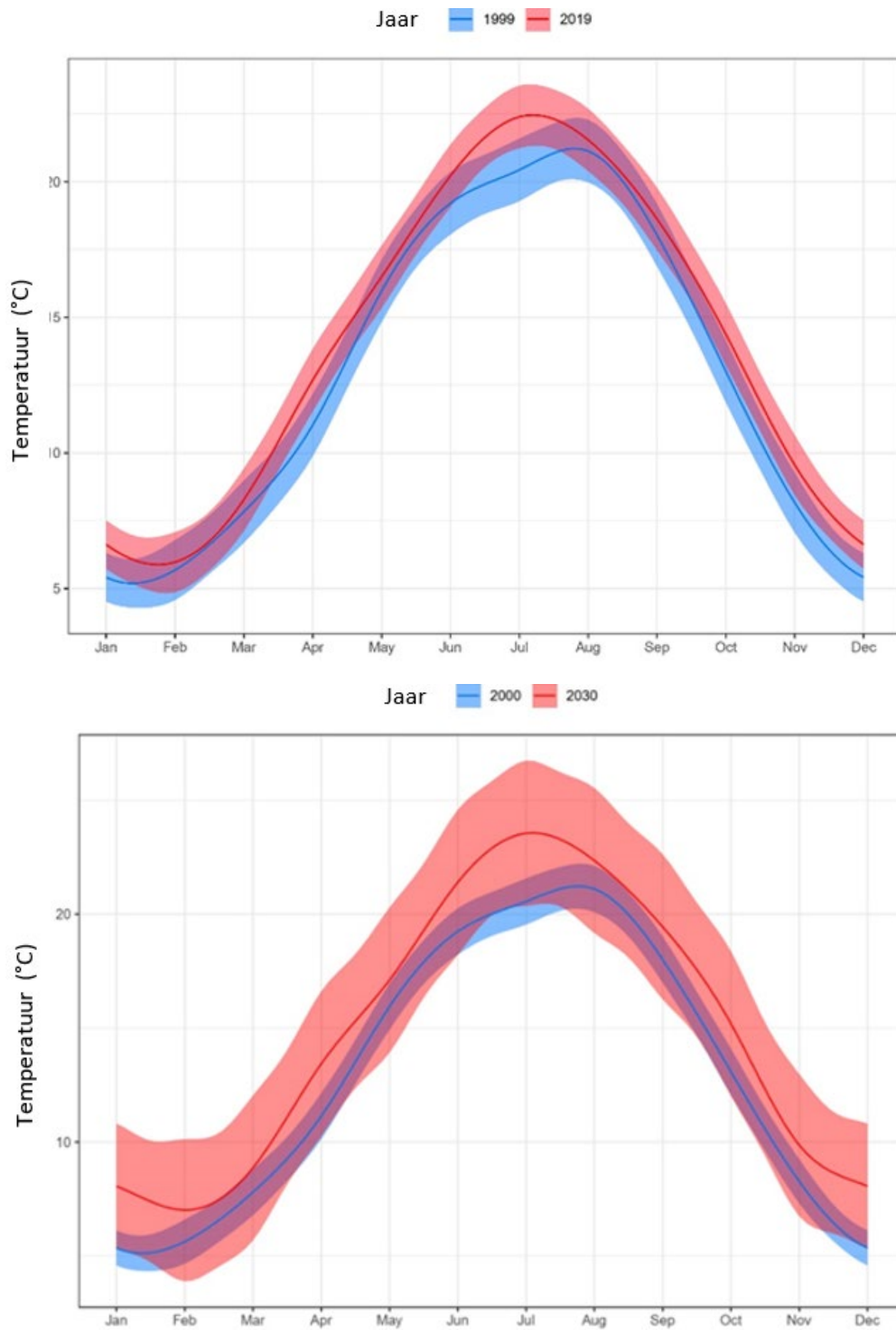


Fig. 17. Gemodelleerde gemiddelde temperaturen voor de Belgische en Nederlandse Maas in de loop van het jaar, voor de referentiejaren 1999/2019 en 2000/2030. De standaardafwijking wordt weergegeven in gekleurde stroken.

Aangezien hetzelfde model gemiddelde maandelijkse voorspellingen van de temperatuur kan geven voor elk jaar van de beschouwde periode, is het mogelijk de voorspellingen maandelijks of per seizoen voor de gehele periode te presenteren. Deze laatste presentatie is te zien in fig. 18.

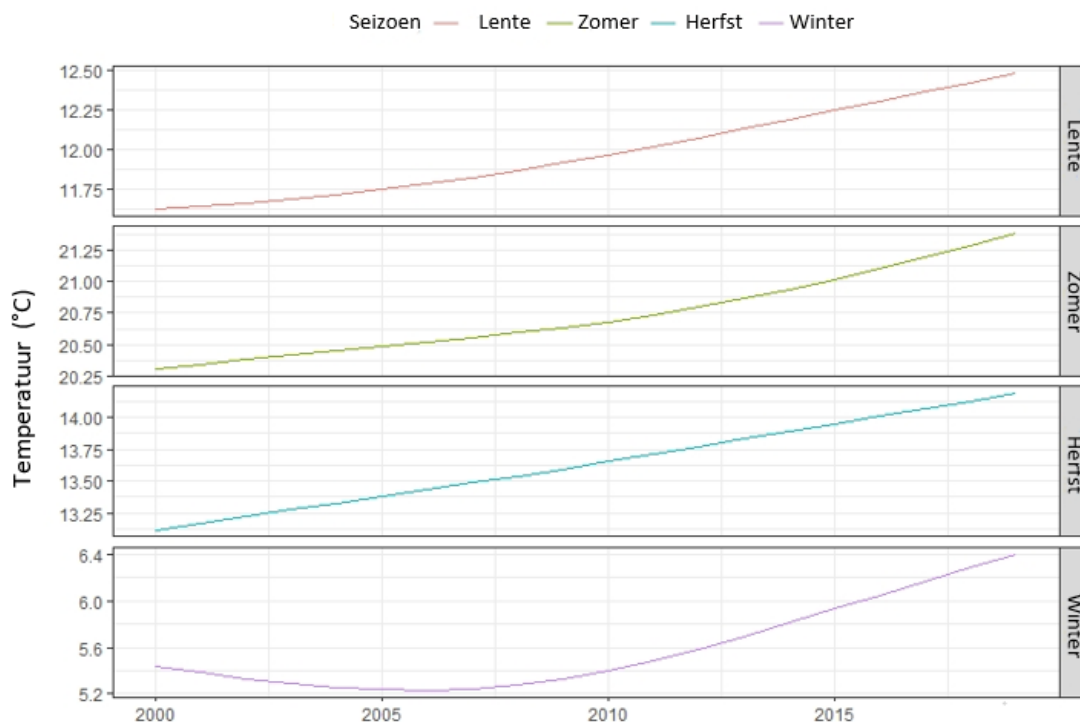


Fig. 18. Gemiddelde gemodelleerde ontwikkeling van de temperatuur per seizoen voor de Belgische en de Nederlandse Maas, in de loop van de referentie jaren 1999/2019.

Ontwikkeling van de jaarlijkse minimum- en maximumtemperaturen per station

Fig. 19 geeft een overzicht van de ontwikkeling van de jaarlijkse minima voor elk van de 4 gecontroleerde stations afzonderlijk, terwijl Fig. 20 een overzicht geeft van de ontwikkeling van de maxima.

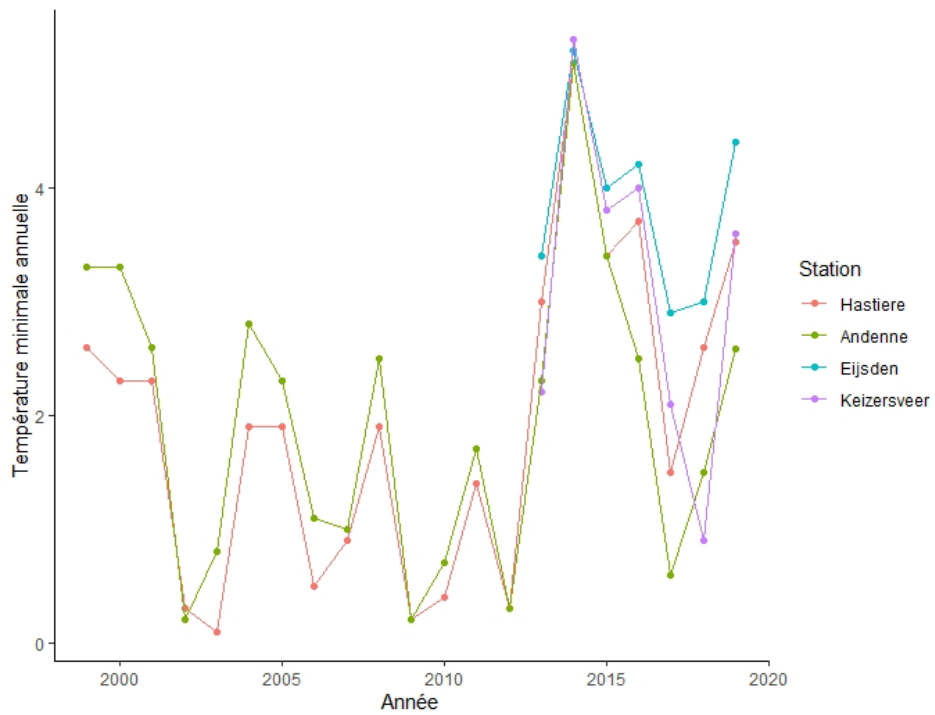


Fig. 19. Jaarlijkse minimumtemperaturen op de vier stations van de Maas voor de periode 1999-2019.

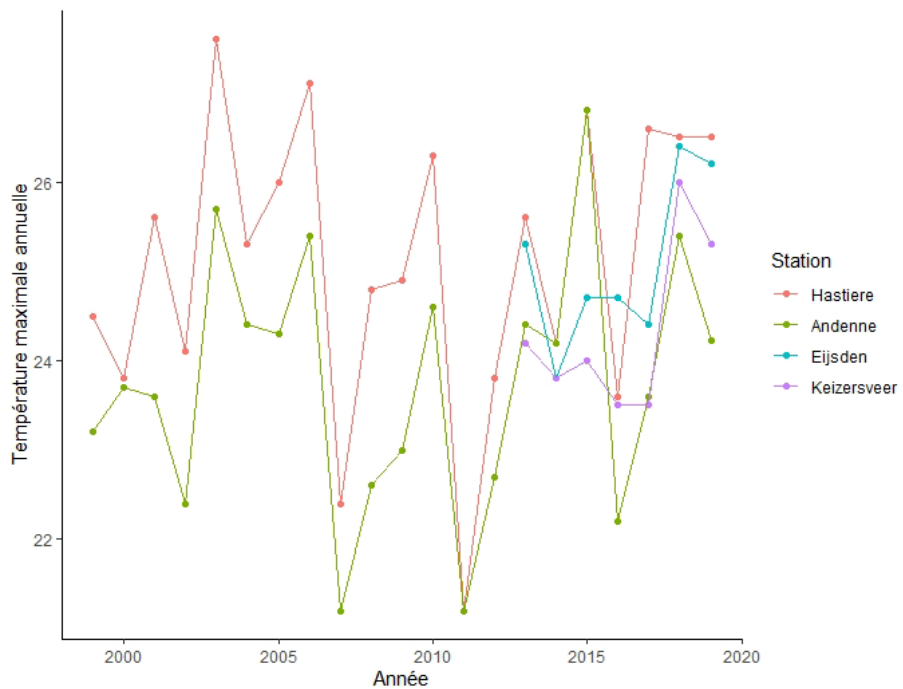


Fig. 20. Jaarlijkse maximumtemperaturen op de vier stations van de Maas afzonderlijk genomen voor de periode 1999-2019.

Ontwikkeling van de jaarlijkse minimum- en maximumtemperaturen voor alle stations

De ontwikkeling van de minimum- en maximumtemperaturen voor alle stations is samengevat in respectievelijk fig. 21 en 22.

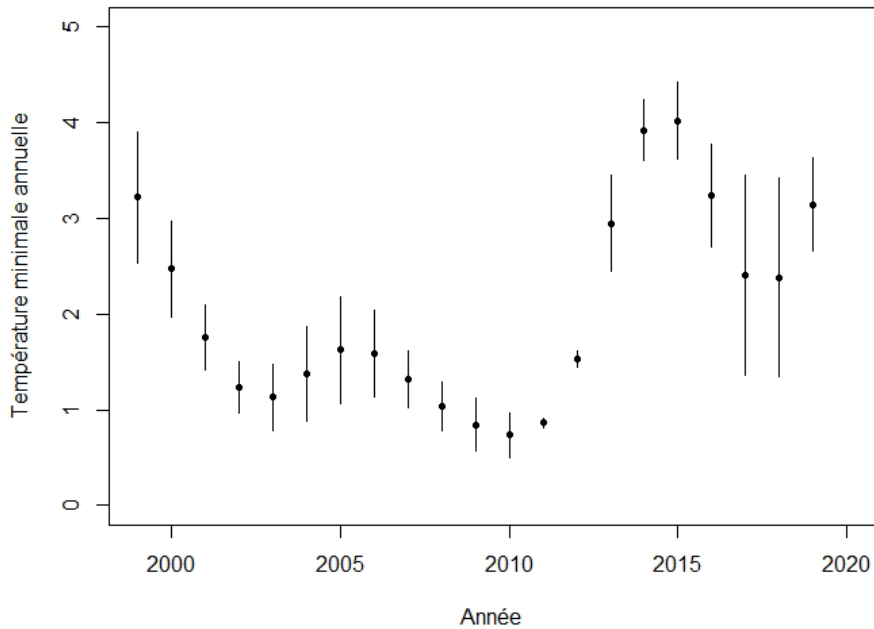


Fig. 21. Jaarlijkse minimumtemperaturen op alle stations van de Maas voor de periode 1999-2019.

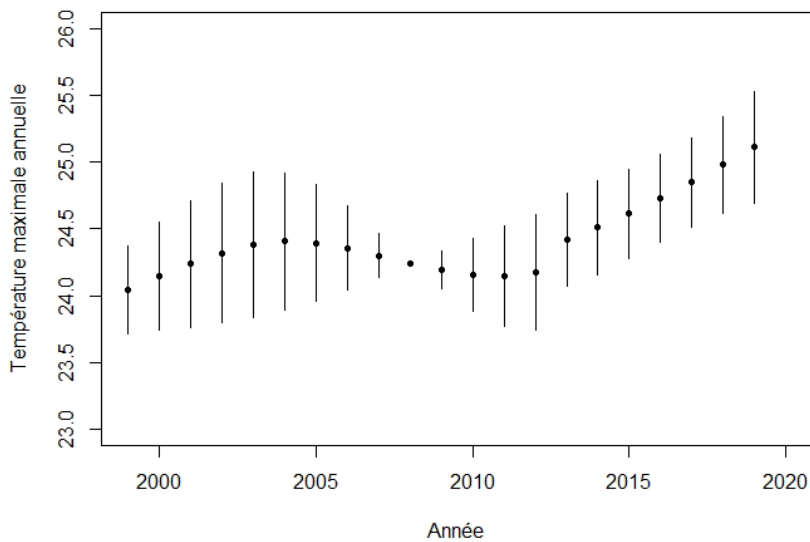


Fig. 22. Jaarlijkse maximumtemperatuur voor alle stations van de Maas voor de periode 1999-2019.



Een hoge watertemperatuur kan een schadelijk effect hebben op de aquatische fauna, met name door de vermindering van de oplosbaarheid van zuurstof die er het gevolg van is. Het leek dan ook interessant om in onderstaande tabel een overzicht te geven van het aantal dagen per jaar waarop de Maas op alle stations samen een temperatuur had van meer dan 25°C, wat al hoog is voor onze regio en voor een rivier als de Maas.

Stations	2001	2003	2004	2005	2006	2010	2013	2015	2017	2018	2019	Som
Hastière	2	13	6	7	17	10	5	5	4	15	10	94
Andenne	0	7	0	0	8	0	0	0	0	8	0	23
Eijsden	0	0	0	0	0	0	9	0	0	14	5	28
Keizersveer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	2	14
Som	2	20	6	7	25	10	14	5	4	49	17	159

Besprekingen en conclusies

De resultaten van de analyse van de beschikbare gegevens op vier Belgisch-Nederlandse stations tonen aan dat de temperatuur van de Maas tussen 1999 en 2019 aanzienlijk is gestegen, met bijna 1°C (Fig. 23). Deze temperatuurstijging is duidelijk zichtbaar op wereldschaal, met een lichte variatie naargelang van de stations en de seizoenen. Zij is bijzonder uitgesproken voor de periode 2013-2019 (fig. 23), aangezien het water in de Maas hoogstwaarschijnlijk is beïnvloed door de meteorologische omstandigheden van de afgelopen jaren

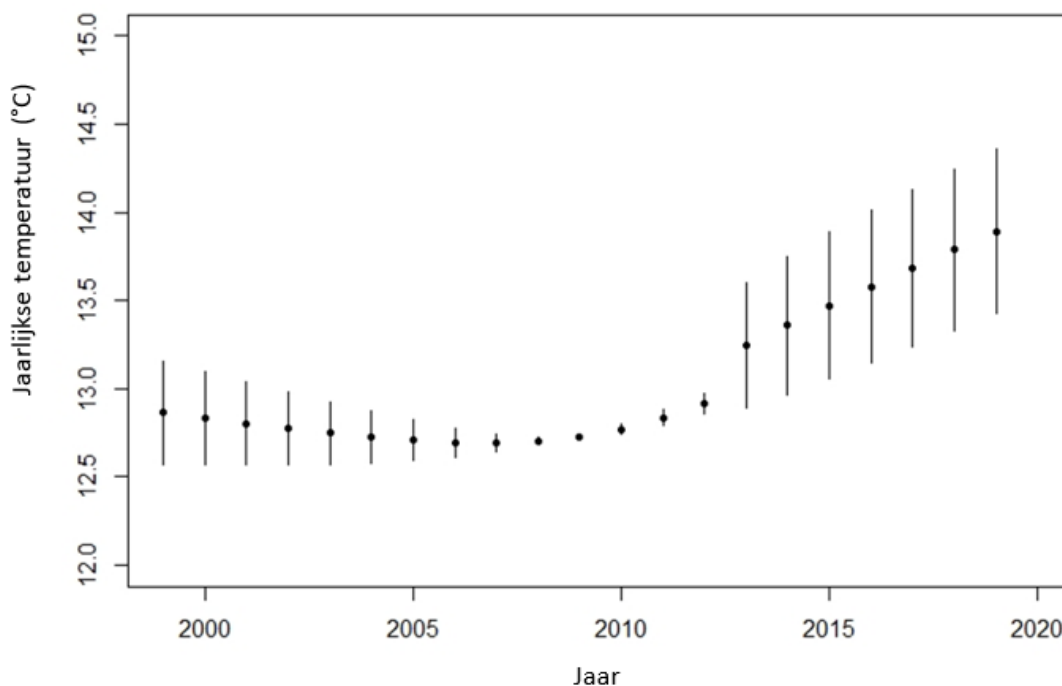


Fig. 23. Ontwikkeling van de jaarlijkse temperaturen (°C) gemodelleerd via een GAM van de Belgische en de Nederlandse Maas gedurende de periode 1999-2019. De standaardafwijking, weergegeven in de vorm van verticale staafjes, geeft de variabiliteit tussen de stations weer.

-Er is geen significant verschil in temperatuur tussen de onderzochte landen ($p = 0,06$), hoewel het station van Eijsden een hogere totale temperatuur heeft dan het station van Keizersveer ($p < 0,001$) en de andere Waalse stations.

De toevoeging van de temperatuurgegevens van dit station kan worden gevisualiseerd aan de hand van de toename van de standaardafwijking voor de periode 2013-2019 (figuur 23). Het station Keizersveer zou verantwoordelijk kunnen zijn voor de versnelling van de temperatuurstijging die vanaf de jaren 2010 is waargenomen. De beschikbaarheid van Nederlandse gegevens over een langere periode zou kunnen helpen om de voorgestelde modellering te verfijnen en betrouwbare voorspellingen te doen voor de komende jaren. De modellen die worden voorgesteld voor de jaren na 2019 blijven zeer discutabel en tamelijk onzeker (zeer grote standaardafwijking).

De ontwikkeling van de temperatuur tussen de seizoenen is niet statistisch getest, maar uit de grafiek blijkt dat de gemiddelde temperatuur van de Maas in het voorjaar sneller stijgt en in de



zomer recordhoogten bereikt. De wintertemperaturen zijn meestal ook lager. De geringe daling van de temperatuur die alleen in Nederland in de herfst werd waargenomen, zou slechts te maken kunnen hebben met de geringe hoeveelheid beschikbare gegevens.

Door de Nederlandse gegevens aan de Waalse gegevens toe te voegen werd het betrouwbaarheidsinterval van de voorspellingen verkleind, en de toekomstige toevoeging van nieuwe gegevens, met inbegrip van Franse gegevens, moet het mogelijk maken het verder te verkleinen en de modellering te verfijnen. Er zij echter op gewezen dat de beschikbare gegevens nog steeds ontoereikend zijn om betrouwbare voorspellingen te doen voor de komende jaren.

De verschillende stations van de Maas overschrijden tijdens de beschouwde periode (1999-2019) gedurende 159 dagen de temperatuur van 25°C. Alleen al in 2018 en 2019 68 dagen (bijna 43%) en 94 dagen (59%) alleen op het station van Hastière. Meer gegevens zouden het mogelijk moeten maken deze laatste waarneming te staven of zelfs een verklarende hypothese voor te stellen.

Geciteerde referenties

- Pinheiro, J.C., and Bates, D.M. (2000) *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer.
- Wood, S.N. (2004) Stable and efficient multiple smoothing parameter estimation for generalized additive models. *Journal of the American Statistical Association*, 99: 673-686
- Wood, S.N. (2006a) Low rank scale invariant tensor product smooths for generalized additive mixed models. *Biometrics*, 62(4) :1025-1036.
- Wood S.N. (2006b) *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman and Hall/CRC Press.
- Zuur, A., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., & Smith, G. M. (2009). *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer Science & Business Media.