



Bericht über die Entwicklung der Temperatur der Maas über einen Zeitraum von 20 Jahren (1999-2019), bewertet auf der Grundlage von Daten aus dem homogenen Messnetz der Internationalen Maaskommission

Hinweis

Wir möchten den Leser auf Folgendes hinweisen:

1/Der Bericht selbst ist sehr fachlich und nicht unbedingt für jedermann zugänglich, aber dank der Zusammenfassung sind die wichtigsten Schlussfolgerungen verständlich.

2/Der Bericht hat sich auf die Analyse der an der Maas beobachteten Temperaturdaten an zwei Messstationen in Wallonien und an zwei weiter stromabwärts (Niederlande) gelegenen Messstationen beschränkt. Die Daten sind beim öffentlichen Dienst Wallonien und beim Rijkwaterstaat erhältlich.

3/Diese Ergebnisse wurden nicht mit den Daten der Bibliographie zum Klimawandel und insbesondere mit den jüngsten Berichten des IPCC (2022) in Beziehung gesetzt.

4/Die Ergebnisse sind örtlich begrenzt und dürfen nicht auf die übrige Maas und ihre Nebenflüsse extrapoliert werden.

Der Nutzer aller oder eines Teils der Informationen des Berichts muss bei der Veröffentlichung folgende Quelle angeben: Internationale Maaskommission (Lüttich).



Berichts über die Entwicklung der Temperatur der Maas über einen Zeitraum von 20 Jahren (1999-2019), bewertet auf der Grundlage von Daten aus dem homogenen Messnetz der Internationalen Maaskommission

Zusammenfassung

Die Temperaturentwicklung der Maas wurde für den Zeitraum 1999-2019 auf der Grundlage von kontinuierlichen Messdaten an vier Standorten, zwei wallonische und zwei niederländische, statistisch analysiert. Aus den Modellergebnissen geht hervor, dass die Flusstemperatur im Berichtszeitraum um fast 1°C deutlich gestiegen ist. Darüber hinaus steigt die Flusstemperatur im Frühjahr am Ende des Zeitraums (2019) schneller an als zu Beginn des Zeitraums (1999), wobei der Höchstwert am Ende des Zeitraums höher ist, länger und früher im Jahr als zu Beginn des Zeitraums erreicht wird. Dieser Anstieg ist sowohl auf globaler als auch auf nationaler Ebene zu beobachten, wobei die Unterschiede zwischen Standorten und Jahreszeiten gering sind. Die Anzahl der Tage, an denen die Durchschnittstemperatur der Maas an mindestens einem der vier Standorte 25 °C übersteigt, wird kurz analysiert. Es gibt keinen Temperaturunterschied zwischen den einzelnen Ländern. Die derzeit verfügbaren Daten reichen nach wie vor nicht aus, um verlässliche Prognosen für die kommenden Jahre zu liefern. Die Hinzufügung neuer Daten, einschließlich der französischen, dürfte dazu beitragen, das Vertrauensintervall der Vorhersagen zu verringern und die Modellierung in einem späteren Bericht zu verfeinern.

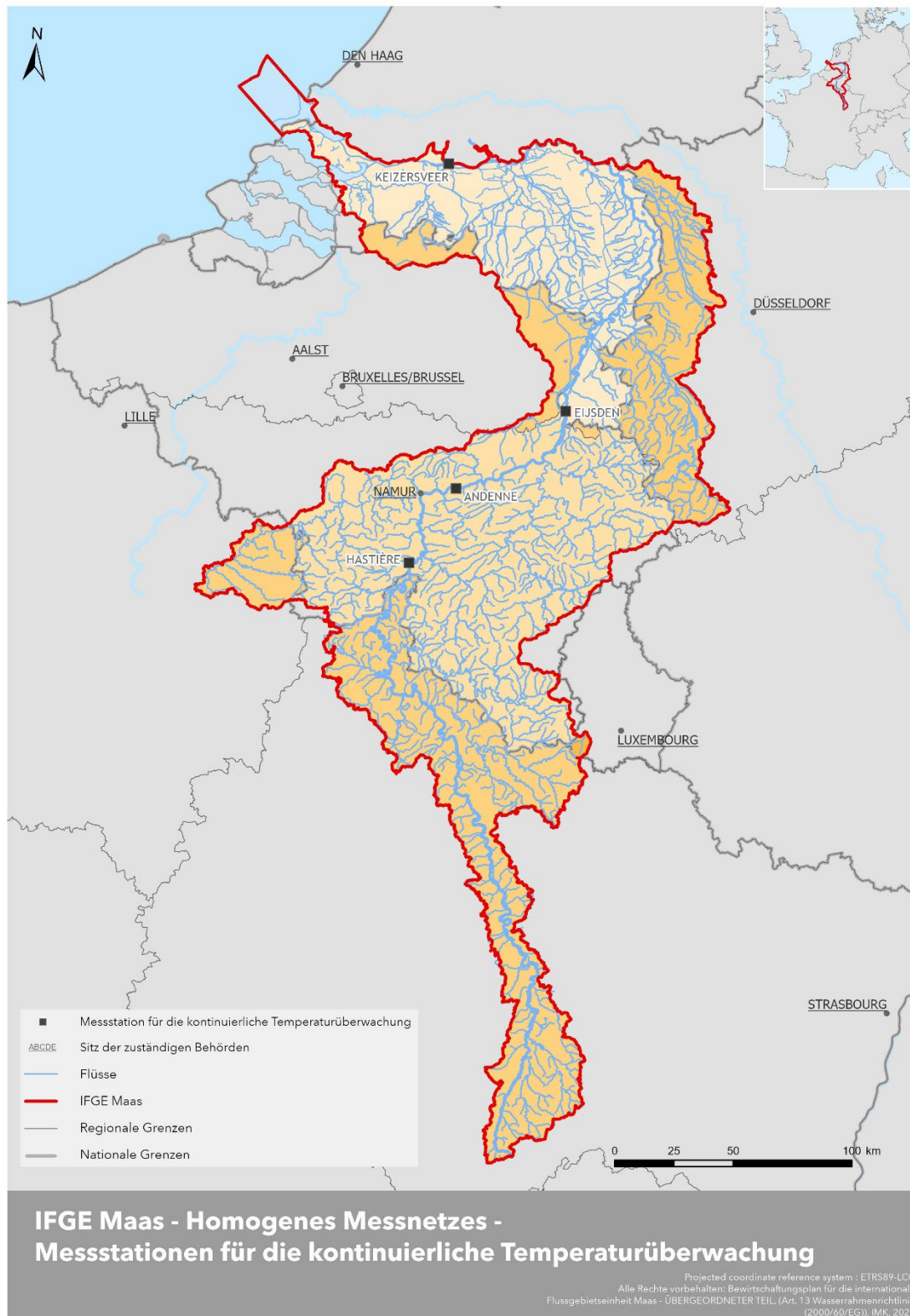
Einleitung

Mandat und Entstehungsgeschichte des Berichtsentwurfs. Im Anschluss an den Beschluss der Delegationsleiter*innen vom 28. Juni 2013, mit dem die in Dokument Maqua/13-15rev über die Behandlung des Themas „Wassertemperatur“ in der Internationalen Maaskommission (IMK) vorgeschlagenen Schlussfolgerungen und Maßnahmen gebilligt wurden, erhielt die Arbeitsgruppe „Monitoring“ (AG M) der IMK das Mandat, „in Zusammenarbeit mit der AG R, der AG A und der AG H an der Bewertung der Überwachung der Auswirkungen des Klimawandels mitzuwirken“. Zu diesem Zweck ist sie mit folgenden Aufgaben betraut:

1. Sammlung und Auswertung der Ergebnisse des Überwachungsnetzes für die Entwicklung der Wassertemperatur der Maas auf der Grundlage von Messungen an Standorten mit kontinuierlicher Überwachung, die bereits über langjährige Datenreihen verfügen;
2. Veröffentlichung eines Berichts über die Temperaturentwicklung für eine erste Messperiode von 20 Jahren und danach alle 10 Jahre (Mmonitor 15-13 und 16-1def).

Zweck dieses Dokuments. Vorlage eines ersten Berichts über die Entwicklung der Temperatur des Flusses über einen Zeitraum von 20 Jahren, gestützt auf vier Standorte (zwei in Wallonien, zwei in den Niederlanden), die während mindestens eines Teils des Berichtszeitraums, d. h.

1999-2019, überwacht wurden. Die Nebenflüsse der Flussgebietseinheit Maas werden derzeit nicht berücksichtigt.



Karte 1: Homogenes Messnetz – Messstationen für die kontinuierliche Temperaturüberwachung



Material und Methoden

Überwachungsstationen. Die vier Überwachungsstandorte (Karte 1) vom Oberlauf bis zum Unterlauf sind: Hastière (X = 182309, Y = 98660, Lambert 72), Andenne (X = 199729, Y = 131480, Lambert 72) (wallonische Stationen), Eijsden ponton (N 50.8108 E 5.6949, GPS-Koordinaten) und Keizersveer (N 51.7202 E 4.8944, GPS-Koordinaten) (niederländische Stationen).

Messgeräte, Genauigkeit, Validierung.

— Wallonien. Die kontinuierliche Temperaturmessung erfolgt über den Temperaturfühler, der in der pH-Sonde des Aquapol-Netzes (Netz zur kontinuierlichen Messung der physikalisch-chemischen Qualität der wallonischen Fließgewässer) enthalten ist (Temperatursensoren: PT 100). Für die hier relevanten Standorte werden die Sonden innerhalb der Messstationen aufgestellt und messen somit die Temperatur des in das Fließgewässer gepumpten Wassers. Die Daten werden einer ersten automatischen algorithmischen Validierung unterzogen und anschließend manuell validiert.

— **Niederlande.** Die Messungen der Wassertemperatur erfolgen im Rahmen des Nationalen Gewässerüberwachungsnetzes (Landelijk Meetnet Water). Die Temperatur wird kontinuierlich über eine in das Fließgewässer eingesetzte Platinelektrode gemessen. Mit einem Galvanometer wird der Drahtwiderstand gemessen, der mit der Wassertemperatur des Flusses korreliert.

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

Verfügbare Daten.

— **Wallonien.** Für die beiden wallonischen Messstellen erstreckt sich der Messzeitraum vom 01/01/1999 bis zum 31/12/2019 mit einem Dateneintrag alle 15 Minuten. Da eine solche Informationsmenge nicht erforderlich ist, um eine mehrjährige Entwicklung nachzuweisen, wurde auf dieser Grundlage ein Tagesdurchschnitt berechnet (Rohdaten in Tabelle 1, verfügbar beim Sekretariat), so dass für beide Standorte insgesamt 15340 Daten erwartet werden, d. h. 7670 Daten pro Station, die der Anzahl der Tage des Zeitraums entsprechen. Die Zahl der tatsächlich verfügbaren Daten beträgt 6895 in Hastière (89,9 % der erwarteten Daten) und 6470 in Andenne (84,3 % der erwarteten Daten). Aufgrund technischer Probleme wurden die Messungen im Zeitraum 1999-2019 entweder für einen der beiden Standorte oder für beide Standorte mehrmals unterbrochen (in den ursprünglichen Tabellen waren alle Werte = 0 oder für drei Zeitpunkte in Hastière eine durchgehend weiße Linie). Diese Unterbrechungszeiträume entsprechen 775 messfreien Tagen in Hastière und 1161 messfreien Tagen in Andenne, d. h. insgesamt 1200 Tage ohne Messungen an mindestens einer der beiden Messstellen.

— **Niederlande.** Für die beiden niederländischen Messstellen erstreckt sich der Messzeitraum vom 14/01/2013 in Eijsden und vom 21/01/2013 in Keizersveer bis zum 31/12/2019, mit einem Dateneintrag pro Sekunde, gemittelt über einen Zeitraum von 10 Minuten. Da eine solche Informationsmenge nicht erforderlich ist, um eine mehrjährige Entwicklung nachzuweisen,

wurde auf dieser Grundlage ein Tagesdurchschnitt berechnet (Tabelle 1, verfügbar beim Sekretariat), der 2538 Daten in Eijsden und 2535 Daten in Keizersveer generierte.

Verbesserung des wallonischen Datensatzes. Wird ein Diagramm erstellt, in dem die jährliche Durchschnittstemperatur (berechnet anhand dieser Tagesmittelwerte) in Abhängigkeit vom Jahr dargestellt wird, um eine mögliche Entwicklung zu veranschaulichen, ergibt sich unmittelbar ein deutlicher Rückgang der Jahresdurchschnittswerte in Hastière in den Jahren 2011-2012 und in Andenne im Zeitraum 2014-2015 (Abbildung 1). Dabei handelt es sich um artefaktische Rückgänge aufgrund der zahlreichen fehlenden Daten (ersetzt durch den Wert 0) für diese beiden Stationen in den betreffenden Zeiträumen.

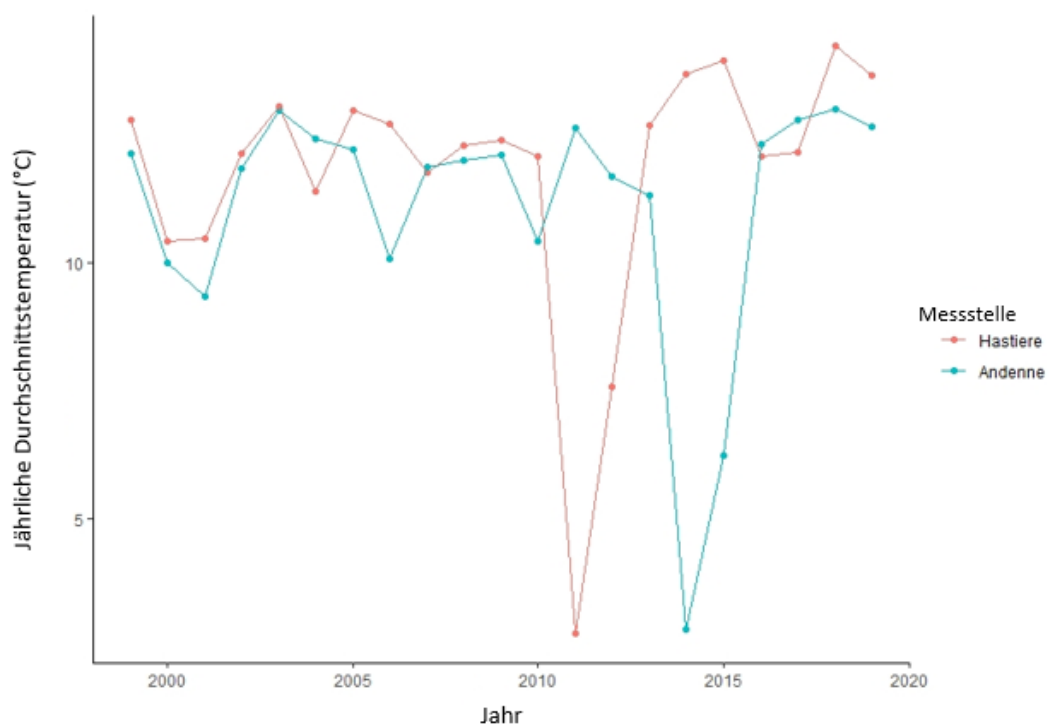


Abb. 1. Jährliche Durchschnittstemperatur an zwei wallonischen Standorten im Zeitraum 1999-2019: Rohdaten.

Da davon ausgegangen wird, dass die Temperaturschwankungen in Hastière und Andenne recht vergleichbar sind, wird jeder an einem wallonischen Standort fehlende Dateneintrag durch den am selben Tag am anderen Standort verzeichneten Wert ersetzt, wenn dieser verfügbar ist.

Insgesamt verbleiben noch 116 Tage ohne Temperaturdaten, da an keinem der beiden wallonischen Standorte zum betreffenden Zeitpunkt eine entsprechende Angabe vorliegt. Aufgrund der Verteilung der fehlenden Daten über kurze Zeiträume (1 bis 12 aufeinanderfolgende Tage) wurde ein nach und nach gewichtetes und auf die vorhandenen Daten gestütztes Mittel für die Einordnung des fehlenden Zeitraums generiert.

Wird auf der Grundlage des so veränderten Datensatzes ein neues Diagramm der jährlichen Durchschnittstemperatur entsprechend dem Jahr erstellt, ergibt sich Abbildung 2.

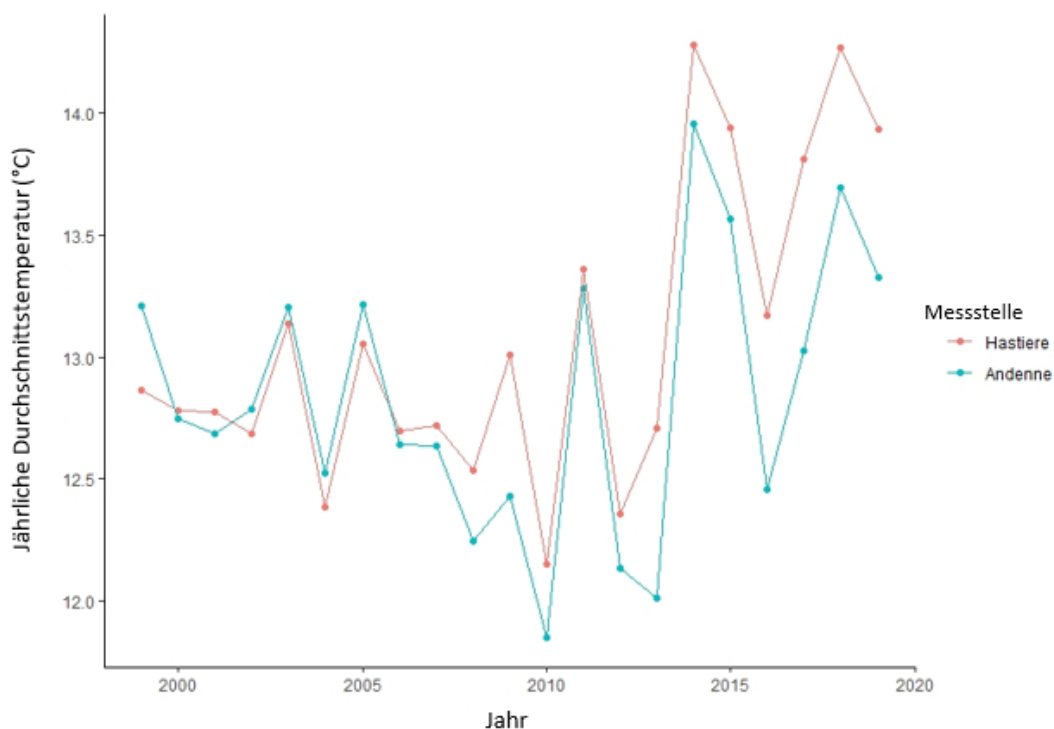


Abb. 2. Jährliche Durchschnittstemperatur an zwei wallonischen Standorten im Zeitraum 1999-2019: Daten geändert.

Verwendete statistische Methoden.

Die Zusammenfassungen der Daten und die Berechnungen wurden mit Hilfe der Software R von Dr. A. Latli durchgeführt, bei der Ausarbeitung des vorliegenden Berichts Mitarbeiter in der Abteilung Natur und Wasser (DEMNA, DGARNE) des öffentlichen Dienstes von Wallonien.

Die Daten werden als Jahresdurchschnittswerte pro Standort (d. h. insgesamt 56 Werte für die 4 Standorte in den 2 Ländern, Tabelle 2, verfügbar beim Sekretariat) und monatliche Durchschnittswerte pro Standort (d. h. insgesamt 672 Werte für die 4 Standorte in den 2 Ländern, 168 für die Niederlande und 504 für Wallonien, Tabelle 3, verfügbar beim Sekretariat) zusammengefasst.

Auf die Jahresdurchschnittswerte pro Standort wird eine lokal gewichtete Streudiagrammglättung (LOESS) angewendet. LOESS (package "stats" in der Software R) ist ein nichtparametrisches Verfahren, mit dem lokal angepasste und geglättete Kurven für eine Punktwolke mithilfe einer Abfolge von Polynomen zweiten Grades, eines „Nachbarschafts“parameters α (standardmäßig mit einem Wert von 0,75) zwischen einem Punkt der Kurve und den nächstgelegenen Punkten der Wolke sowie eines Gewichtungsparameters P desselben Punktes der Kurve erstellt werden können.

Die monatlichen Durchschnittstemperaturen pro Standort werden anhand generalisierter additiver gemischter Modelle (GAMM) „mgcv“-package der Software R modelliert. Ein generalisiertes additives Modell (engl. „generalized additive model“, GAM) ist ein statistisches



Modell, das die Eigenschaften des allgemeinen linearen Modells (engl. GLM, eine Generalisierung der linearen Regression) mit den Eigenschaften des Zusatzmodells zusammenfasst, wobei die Summe der erklärenden Variablen (daher der Begriff „additiv“) zugrunde gelegt wird. Ein generalisiertes additives gemischtes Modell kombiniert die Eigenschaften eines GAM mit denen eines gemischten Modells (das seinerseits feste und zufällige Effekte kombiniert). Dieser Ansatz wird häufig zur Modellierung von Trends bei abiotischen oder biotischen Parametern verwendet (Zuur *et al.* 2009).

Die GAMMs werden zunächst unter Verwendung eines sogenannten naiven Modells entwickelt, d. h. ohne Berücksichtigung der möglichen Autokorrelation der Daten (d. h. des Einflusses der Temperatur eines Tages auf die an den folgenden Tagen gemessene Temperatur). Diese wird dann durch Addition eines Arguments („corStruct“ des „lme“-package der Software R) verbessert, um die Verzerrungen im Zusammenhang mit der in den Daten enthaltenen Autokorrelation im Jahresverlauf zu quantifizieren und zu verringern. Da sich daraus mehrere Modelle ergeben können, die die Autokorrelation mehr oder weniger stark verringern, wird das relevanteste Modell über eine ANOVA ausgewählt, indem der Anpassungsgewinn (AIC) zwischen Modellen (Wood 2004, 2006a und 2006b) geprüft wird. Die Ergebnisse der Analyse sind in den Tabellen 4-6, verfügbar beim Sekretariat, beschrieben. Nur diejenigen, die sich auf das bevorzugte Modell beziehen (in den vorstehend genannten Tabellen 4-6 fett gedruckt), werden nachstehend vorgestellt und erörtert.

Die Daten werden nacheinander nur für Wallonien, nur für die Niederlande und dann für alle 4 Standorte in beiden Ländern nach denselben Methoden analysiert. Die Entwicklung der jährlichen Mindest- und Höchsttemperaturen für alle Standorte und pro Standort wird außerdem grafisch zusammengefasst, unter Angabe der Anzahl der Tage, an denen eine Schwellentemperatur (25 °C) überschritten wurde.

Ergebnisse

Wallonische Daten

Jahresdurchschnittswerte pro Standort

Wird in dem Diagramm der jährlichen Durchschnittstemperatur entsprechend dem Jahr, gestützt auf den konsolidierten Datensatz in Abbildung 2, eine LOESS vorgenommen, ergibt sich das Diagramm in Abbildung 3. Die Kurven scheinen nach einem leichten Rückgang zwischen 2005 und 2010 einen relativ deutlichen Temperaturanstieg insbesondere in Hastière aufzuzeigen, wobei zum jetzigen Zeitpunkt keine weiteren Informationen gewonnen werden können.

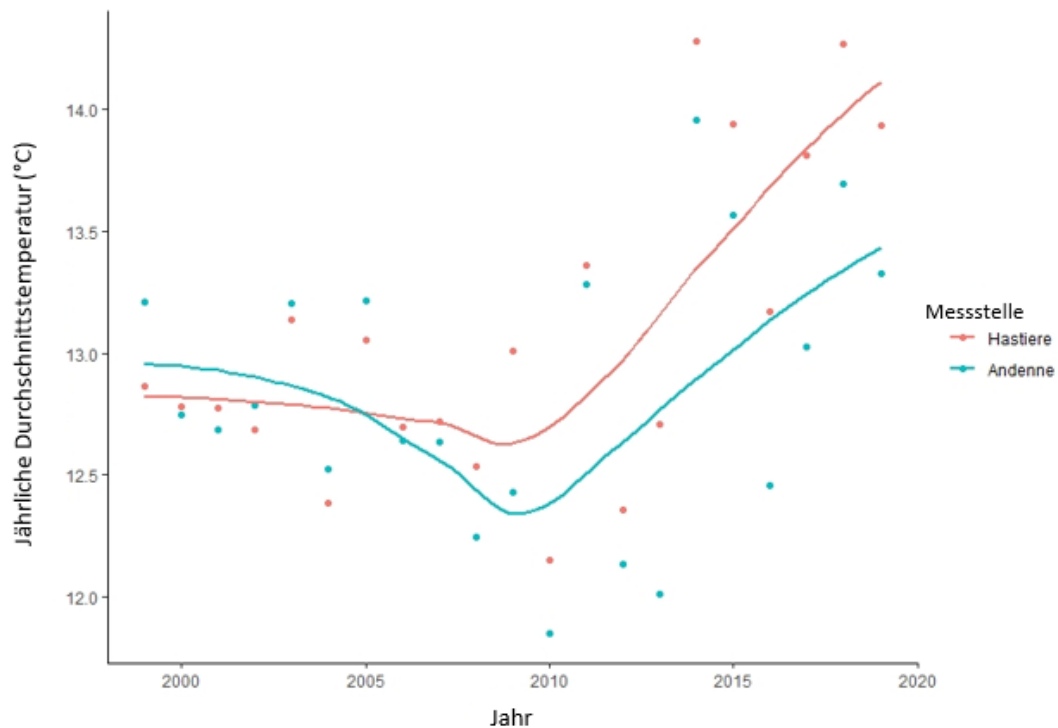


Abb. 3. Jährliche Durchschnittstemperatur an zwei wallonischen Standorten im Zeitraum 1999-2019: LOESS.

Monatliche Durchschnittswerte pro Standort

Um die verfügbaren Daten genauer analysieren zu können, wird ein generalisiertes additives gemischtes Modell auf die monatlichen Temperaturmittelwerte angewandt. Dabei werden (1) der Effekt „Monat“ (da die Durchschnittstemperatur im Laufe der Monate natürlich variiert) (,s (Mois)‘ in der Software R), (2) der mögliche Stationseffekt (,Station‘) und (3) die Auswirkungen der zeitlichen Entwicklung (,s (Time)‘ in der Software R), der sich aus dem Klimawandel ergeben könnte, berücksichtigt. Das Modell wird so ausgewählt, dass die Autokorrelation der Daten so gering wie möglich gehalten wird (Tabelle 4, verfügbar beim Sekretariat im Anhang).

Das bevorzugte und auf die 504 Monatsdurchschnittswerte an beiden wallonischen Standorten angewandte Modell ist:

$$T_{moy} \sim s(\text{Mois}, \text{bs} = \text{"cc"}, k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Station})$$

Die Ergebnisse stellen sich wie folgt dar:

	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

Die für ein Jahr prognostizierten Temperaturen sind in Abbildung 4 dargestellt, das Temperaturdiagramm für den Zeitraum 1999-2019 in Abbildung 5. Letzteres weist auf einen Temperaturanstieg von deutlich mehr als 0,5 °C zwischen 1999 und 2019 hin.

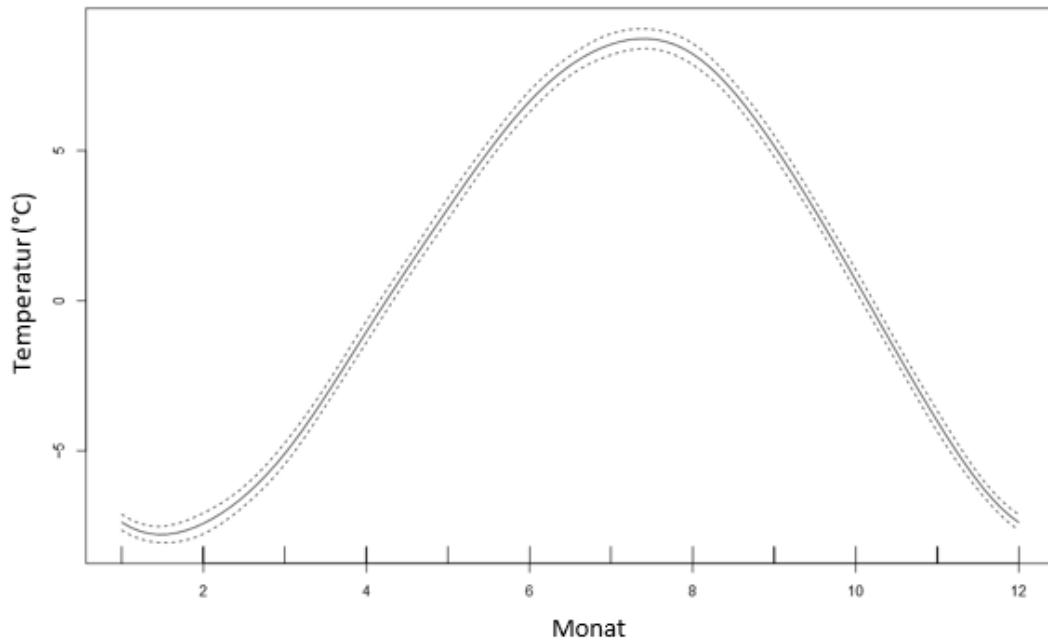


Abb. 4. Veränderung der reduzierten Durchschnittstemperaturen in der Mittellinie (°C), die über ein GAM für die beiden wallonischen Standorte im Zeitraum 1999-2019 modelliert wurden, im Jahresverlauf. Die Standardabweichung ist als gepunktete Linie angegeben.

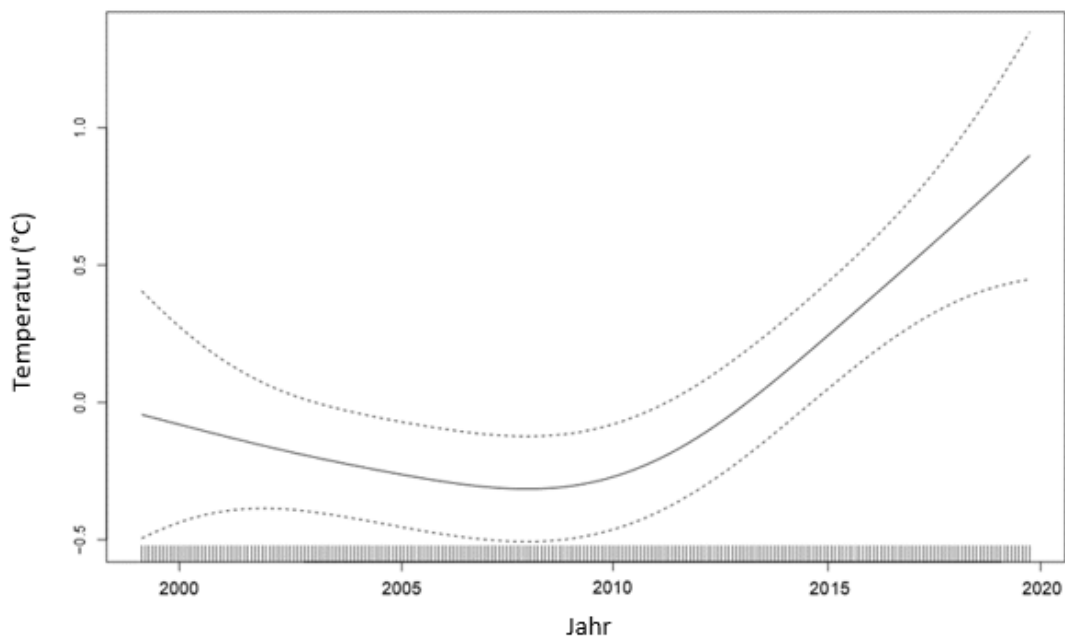


Abb. 5. Entwicklung der reduzierten Durchschnittstemperaturen in der Mittellinie (°C), die über eine GAM für die beiden wallonischen Standorte im Zeitraum 1999-2019 modelliert wurden. Die Standardabweichung ist als gepunktete Linie angegeben.



Die in der vorstehenden Tabelle aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass

- (1) das Modell relevant ist ($R^2 = 0,956$),
- (2) es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den wallonischen Standorten hinsichtlich der Temperaturentwicklung ($p = 0,07$) gibt,
- (3) der monatliche Effekt erwartungsgemäß statistisch sehr signifikant ($p < 0,001$) ist, ebenso wie der zeitliche Effekt ($p < 0,001$), der eindeutig positiv ist,
- (4) die Restautokorrelation sehr gering ist.

Um die monatliche Temperaturentwicklung im gesamten Zeitraum 1999-2019 zu analysieren und Prognosen zu erstellen, wird ein neues GAM generiert (R^2 , bereinigt um 0,956), indem die monatlichen Temperaturen der beiden wallonischen Standorte gemittelt werden.

Werden in ein und demselben Diagramm die für jeden Monat des Jahres prognostizierten Temperaturen für zwei Jahre am Anfang und am Ende des Berichtszeitraums dargestellt, so ergibt sich das erste Schaubild in Abbildung 6. Da der Bezugszeitraum kurz ist, überschneiden sich die Konfidenzintervalle. Es ist jedoch klar erkennbar, dass die Temperatur des Flusses im Frühjahr 2018 schneller ansteigt als im Jahr 1999 und dass die Höchsttemperatur auch höher ist, früher (Juli statt August) erreicht wird und 2018 länger anhält, wobei sich die etwas niedrigeren Wintertiefstwerte in den Februar zu verschieben scheinen. Anschließend wird eine Modellierung für den Zeitraum 2000-2030 versucht.

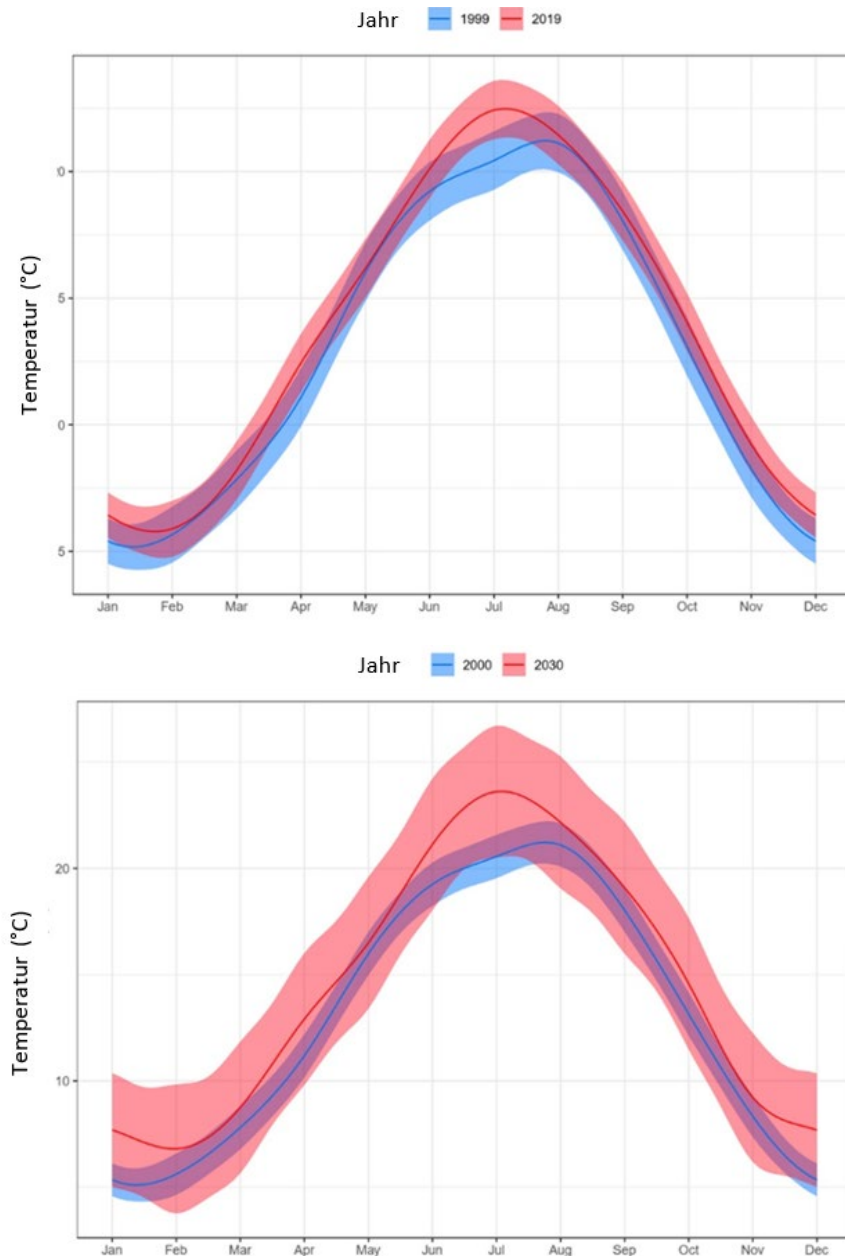


Abb. 6. Veränderung der modellierten Durchschnittstemperaturen an den beiden wallonischen Standorten für die Bezugsjahre 1999/2019 und 2000/2030 im Jahresverlauf. Die Standardabweichung wird als Farbstreifen dargestellt.

Da die gleiche Modellierung Prognosen für die monatliche Durchschnittstemperatur für jedes Jahr des Berichtszeitraums liefern kann, können die Prognosen für den gesamten Zeitraum monatlich oder pro Saison vorgelegt werden. Die letztgenannte, recht aussagekräftige Darstellung findet sich in Abbildung 7.

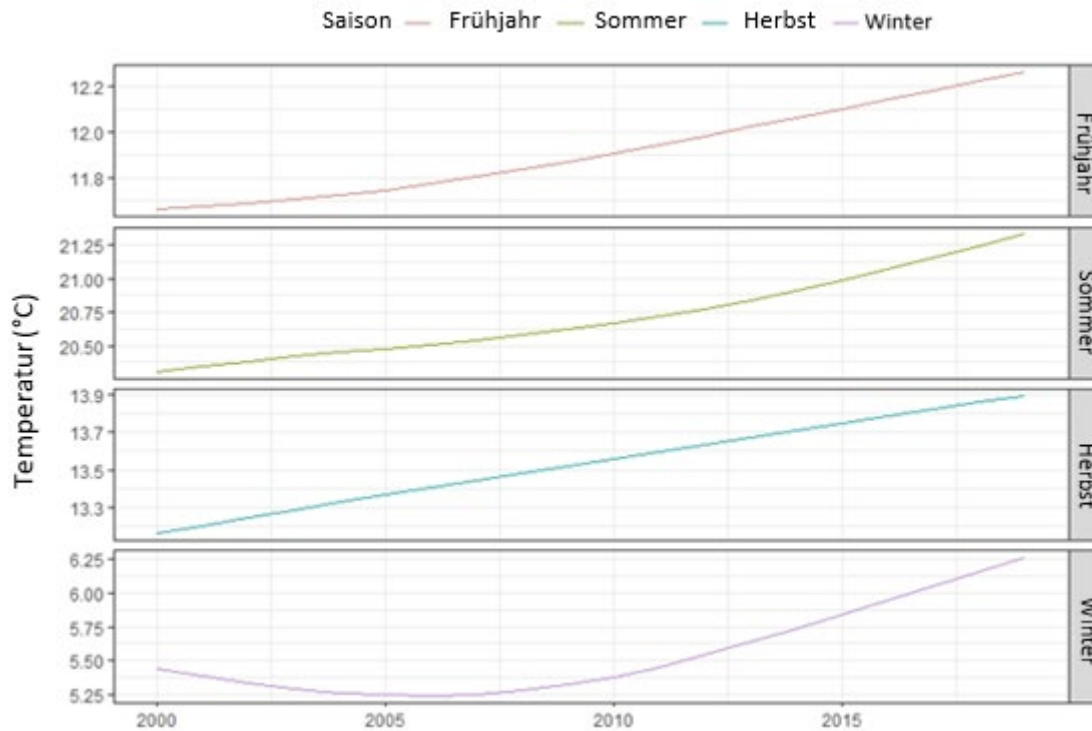


Abb. 7. Entwicklung der modellierten saisonalen Durchschnittstemperaturen für die beiden wallonischen Standorte im Jahresverlauf, während der Bezugsjahre 1999/2019.

Niederländische Daten

Die niederländischen Daten werden nach derselben Methodik verarbeitet wie die wallonischen Daten, wobei das Zeitintervall deutlich kürzer ist, was teilweise die Qualität und Genauigkeit der Modellierung beeinträchtigen kann.

Jahresdurchschnittswerte pro Standort

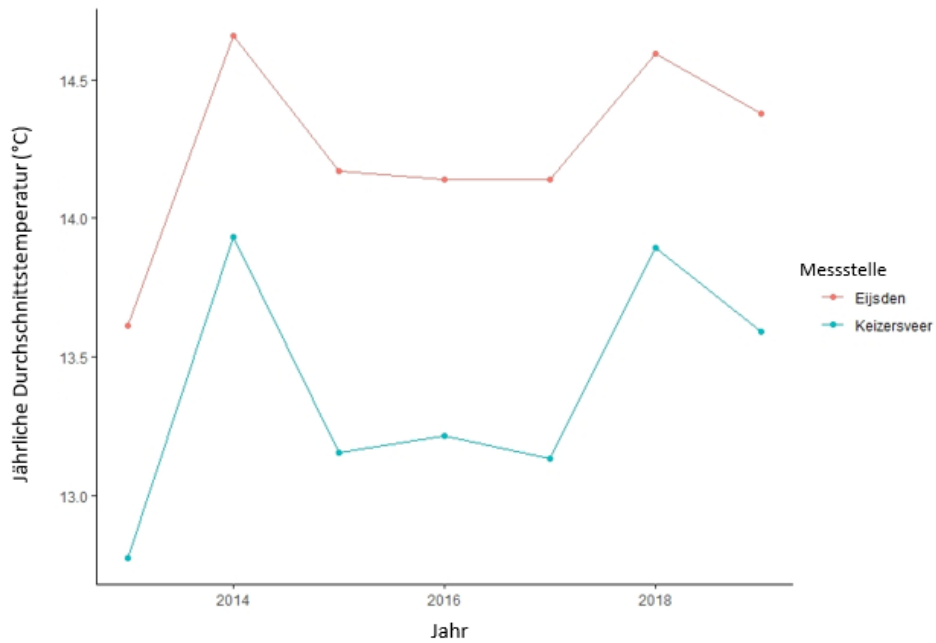


Abb. 8. Jährliche Durchschnittstemperatur zweier niederländischer Standorte im Zeitraum 2013-2019.

Wird im jährlichen Durchschnittstemperaturdiagramm für das Jahr in Abbildung 8 eine LOESS vorgenommen, so ergibt sich das Diagramm in Abbildung 9.

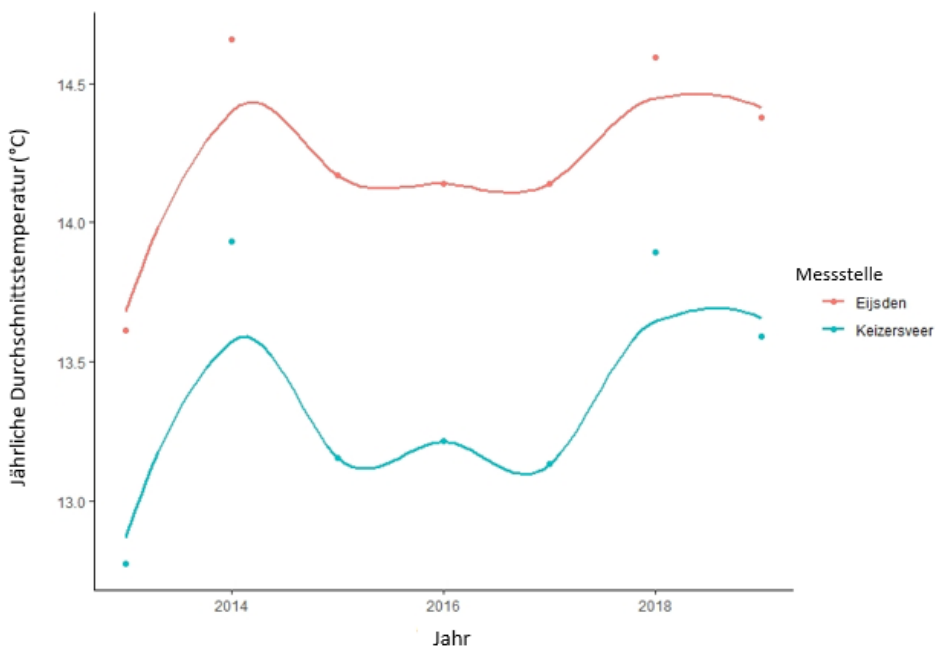


Abb. 9. Jährliche Durchschnittstemperatur zweier niederländischer Standorte im Zeitraum 2013-2019: LOESS.

Monatliche Durchschnittswerte pro Standort

Das zu bevorzugende und auf die 168 monatlichen Durchschnittswerte für die beiden niederländischen Standorte angewandte Modell (Anhang 3, verfügbar beim Sekretariat) ist folgendes auf die:

$$T_{moy} \sim s(\text{Mois}, \text{bs} = \text{"cc"}, k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Station})$$

Die Ergebnisse stellen sich wie folgt dar:

	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

Das Diagramm über ein Jahr prognostizierten Temperaturen findet sich in Abbildung 10, die Temperaturdiagramme für den Zeitraum 2013-2019 sind in Abbildung 11 dargestellt.

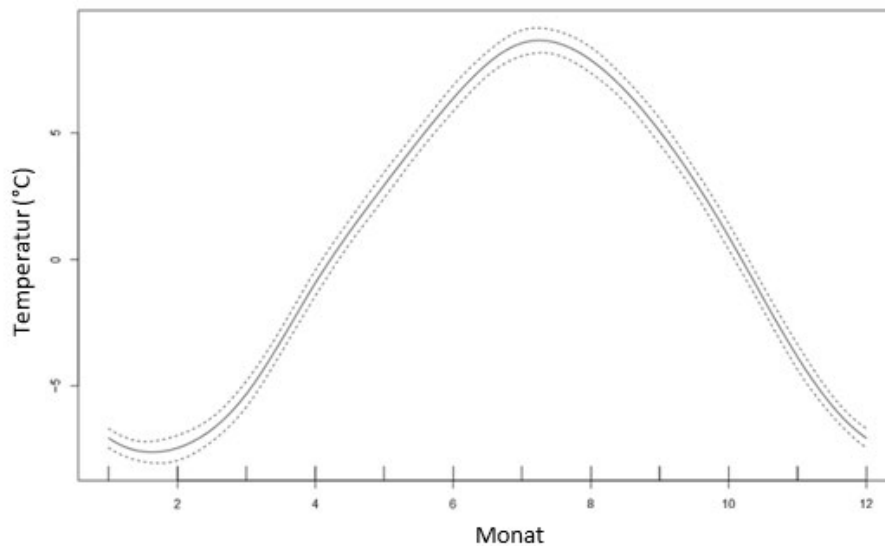


Abb. 10. Veränderung der reduzierten Durchschnittstemperaturen in der Mittellinie (°C), die über ein GAM für die beiden niederländischen Standorte im Zeitraum 2013-2019 modelliert wurden, im Jahresverlauf. Die Standardabweichung ist als gepunktete Linie angegeben.

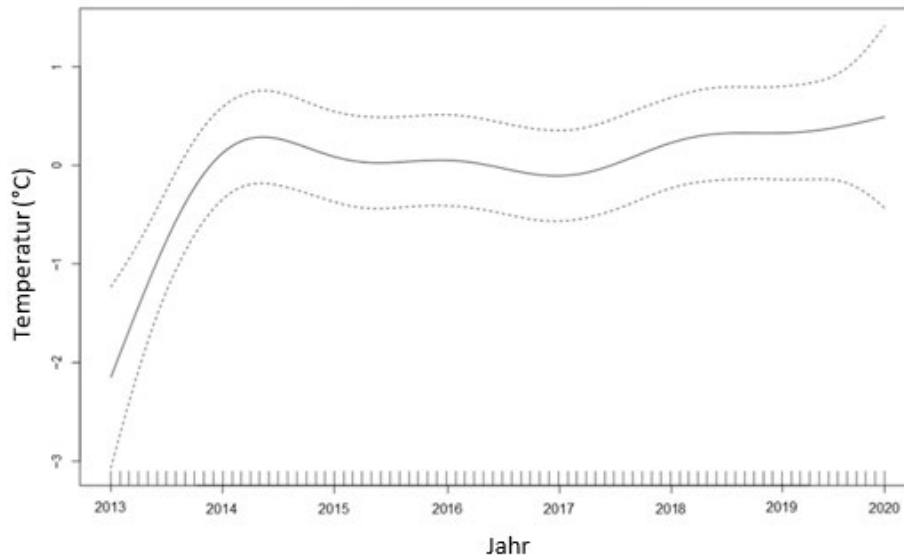


Abb. 11. Entwicklung der reduzierten Durchschnittstemperaturen in der Mittellinie (°C), die über eine GAM für die beiden niederländischen Standorte im Zeitraum 2013-2019 modelliert wurden. Die Standardabweichung ist als gepunktete Linie angegeben.

Die Ergebnisse in der vorstehenden Tabelle, die den Ergebnissen in Wallonien recht ähnlich sind, zeigen, dass

- (1) das Modell ist relevant ($R^2 = 0,96$),
- (2) ein signifikanter Unterschied zwischen den niederländischen Messstellen hinsichtlich der Temperaturentwicklung ($p = 1,39 \cdot 10^{-5}$) besteht.
- (3) der monatliche Effekt erwartungsgemäß statistisch sehr signifikant ($p < 0,001$), ebenso wie der zeitliche Effekt $p = 0.0016$, der eindeutig positiv ist.
- (4) die Restautokorrelation sehr gering ist.

Zur Analyse der monatlichen Temperaturentwicklung im gesamten Zeitraum 2013-2019 wird bei den monatlichen Temperaturen an beiden niederländischen Standorten eine neue GAM erzeugt.

Werden in ein und demselben Diagramm die für jeden Monat des Jahres prognostizierten Temperaturen für zwei Jahre am Ende des Berichtszeitraums dargestellt, so ergibt sich das erste Schaubild in Abbildung 12. Anschließend wird eine Modellierung für den Zeitraum 2015-2025 versucht.

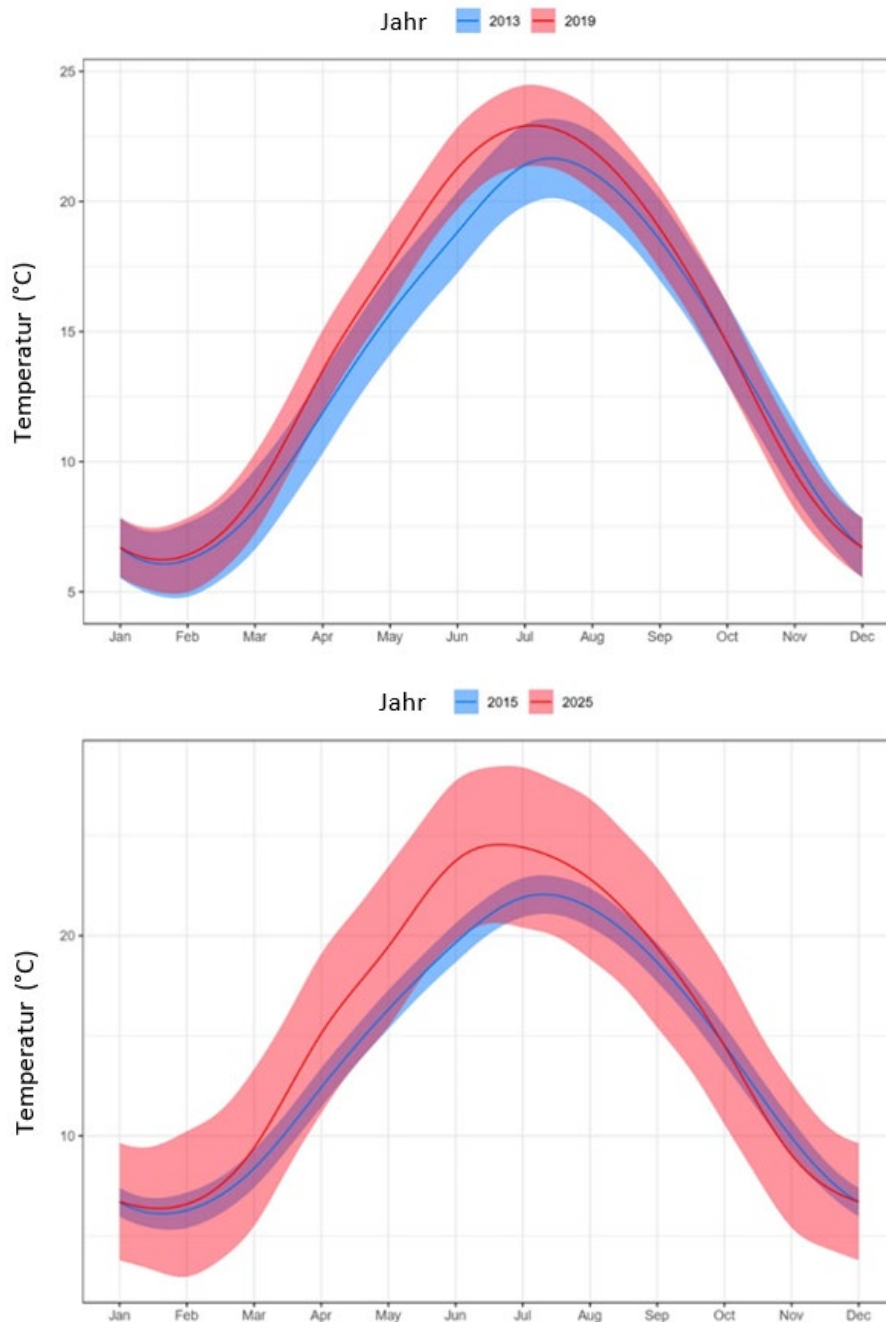


Abb. 12. Veränderung der modellierten Durchschnittstemperaturen an den beiden niederländischen Standorten für die Bezugsjahre 2013/2019 und 2015/2025 im Jahresverlauf. Die Standardabweichung wird als Farbstreifen dargestellt.

Aufgrund des kurzen Bezugszeitraums überschneiden sich die Konfidenzintervalle. In Abbildung 12 wird jedoch erneut deutlich, dass die Temperatur des Flusses im Frühjahr 2019 schneller ansteigt als im Jahr 2013 und dass die Höchsttemperatur auch höher ist, früher (gegen Anfang Juli statt Mitte Juli) erreicht wird und 2019 länger anhält.

Da die gleiche Modellrechnung Prognosen für die monatliche Durchschnittstemperatur für jedes Jahr des Berichtszeitraums liefern kann, können die Prognosen für den gesamten Zeitraum monatlich oder pro Saison vorgelegt werden. Die letztgenannte Präsentation findet sich in Abbildung 13.

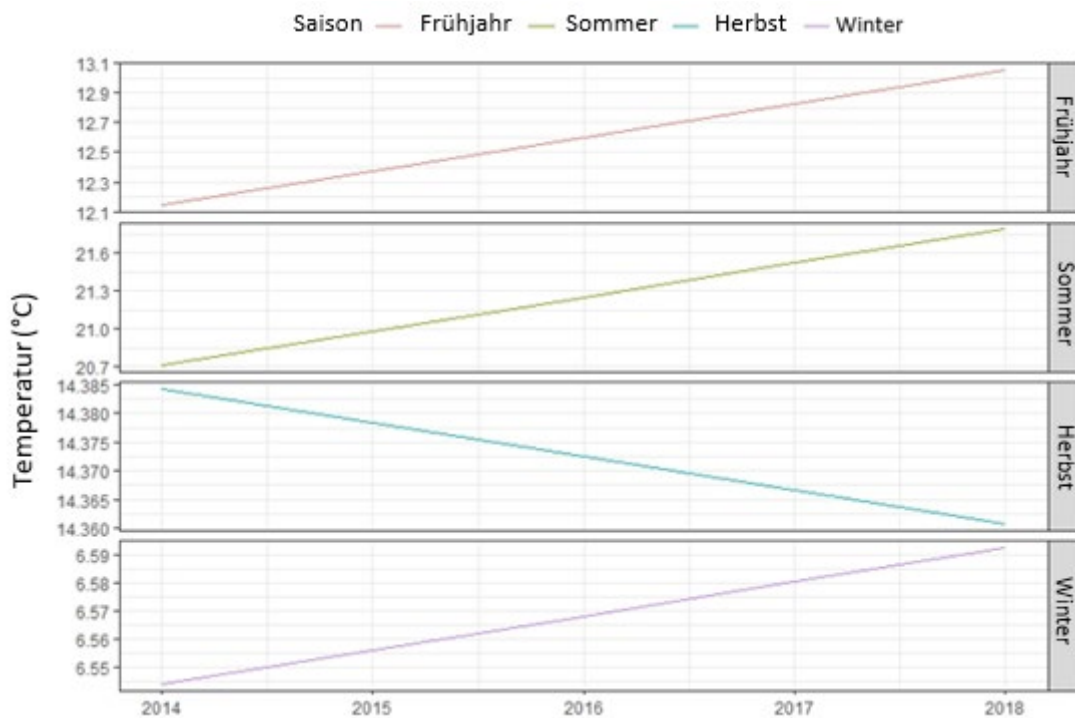


Abb. 13. Entwicklung der pro Saison gemittelten modellierten Temperaturen an den beiden niederländischen Standorten im Jahresverlauf, in den Bezugsjahren 2014/2018.

Gesamtanalyse aller Daten

Die Daten der 4 Standorte in den 2 Ländern werden nach denselben Methoden wie zuvor analysiert.

Jahresdurchschnittswerte pro Standort

In Abbildung 14 wird die Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur an allen Standorten dargestellt, wobei sich der Standort Eijsden deutlich abhebt.

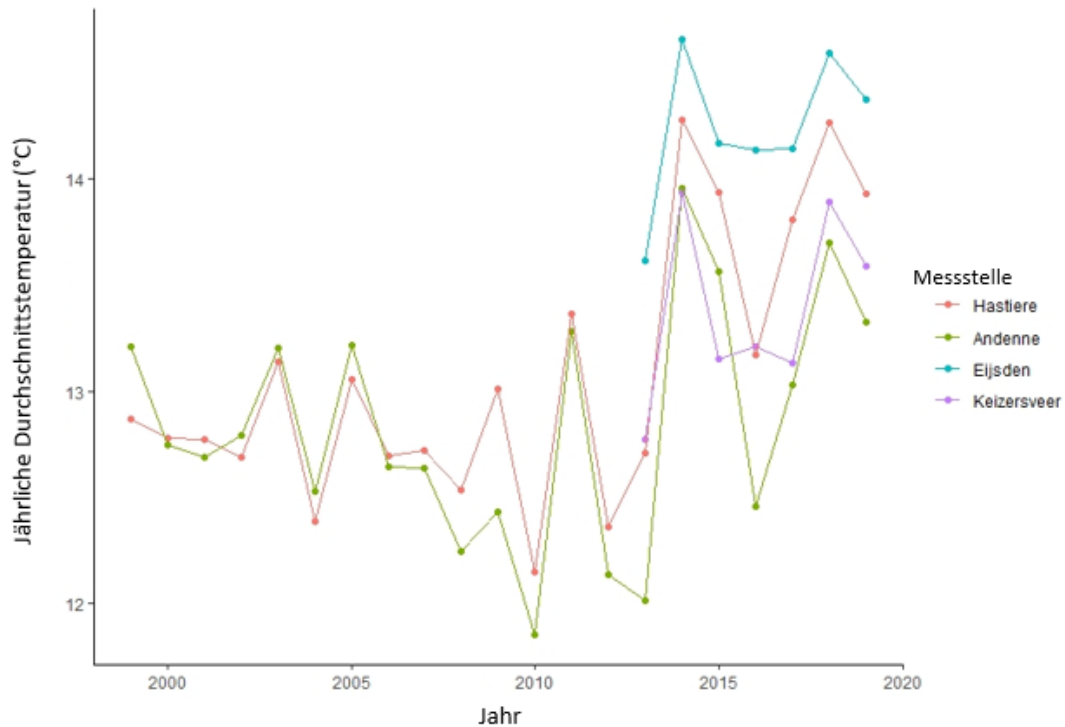


Abb. 14. Jährliche Durchschnittstemperatur an den vier untersuchten wallonischen und niederländischen Standorten im Zeitraum 1999-2019.

Monatliche Durchschnittswerte pro Standort

Wie zuvor wird ein generalisiertes additives Modell auf die monatlichen Durchschnittswerte angewandt, wobei der monatliche Effekt, der mögliche jährliche Effekt und der mögliche Ländereffekt berücksichtigt werden.

$$T_{moy} \sim s(\text{Mois}, bs = "cc", k = 12) + s(\text{Time}) + (\text{Pays})$$

Die Ergebnisse stellen sich wie folgt dar:

	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

Trotz der höheren Temperaturwerte in Eijsden ist der „Länder-Effekt statistisch nicht signifikant ($p = 0,06$). Wie bei früheren Modellen ist das Modell hingegen sehr signifikant ($R^2 = 0,96$), der monatliche Effekt ist stark ausgeprägt und vor allem die Durchschnittstemperatur ($p < 0,001$) ist im betrachteten Zeitraum erheblich gestiegen.

Die modellierten Temperaturen in einem Jahr sind in Abbildung 15 dargestellt, die Temperaturdiagramme für den Zeitraum 1999-2019 in Abbildung 16.

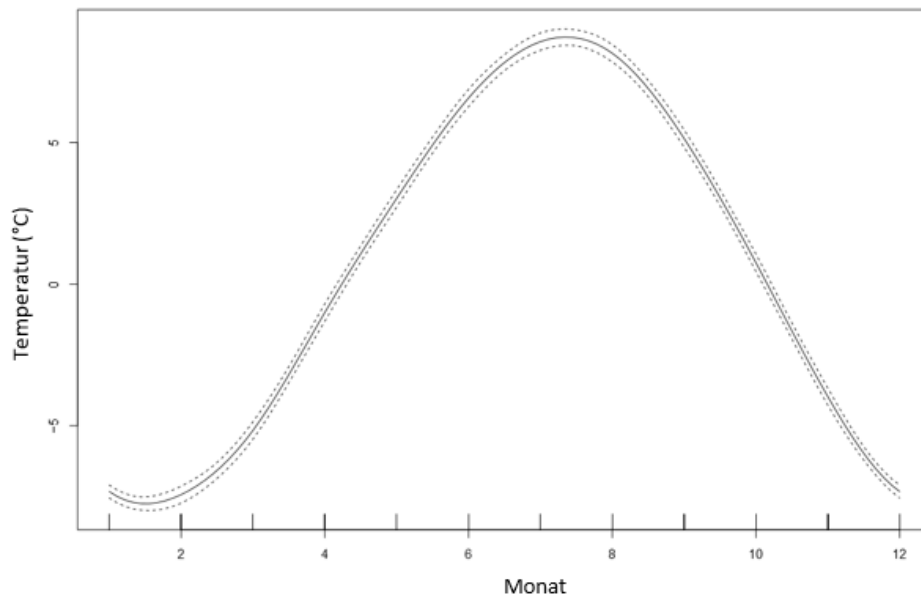


Abb. 15. Veränderung der mittleren Durchschnittstemperaturen (°C), die über ein GAM der belgischen und der niederländischen Maas im Zeitraum 1999-2019 modelliert wurden, im Jahresverlauf. Die Standardabweichung ist als gepunktete Linie angegeben.

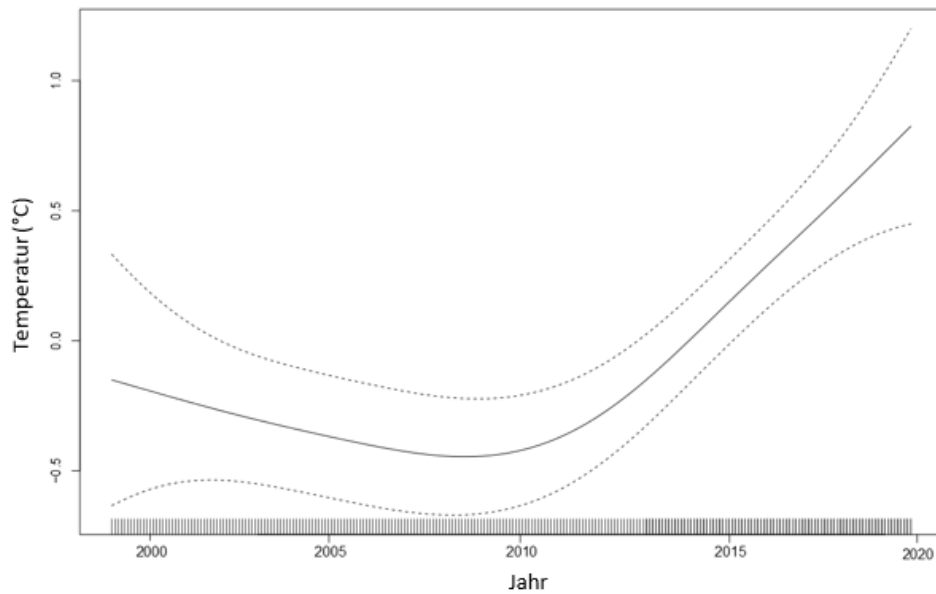


Abb. 16. Entwicklung der reduzierten Durchschnittstemperaturen in der Mittellinie ($^{\circ}\text{C}$), die über ein GAM der belgischen und der niederländischen Maas im Zeitraum 1999-2019 modelliert wurden. Die Standardabweichung ist als gepunktete Linie angegeben. Es sei darauf hingewiesen, dass dieses Intervall durch die Integration der niederländischen Daten für die jüngsten Zeiträume verkürzt werden kann (Vergleich mit Abbildung 5).

Werden in ein und demselben Diagramm die für jeden Monat des Jahres vom Vorgängermodell prognostizierten Temperaturen für zwei Jahre am Ende des Berichtszeitraums dargestellt, so ergibt sich das erste Schaubild in Abbildung 17, wobei anschließend eine Modellierung für den Zeitraum 2000-2030 versucht wird.

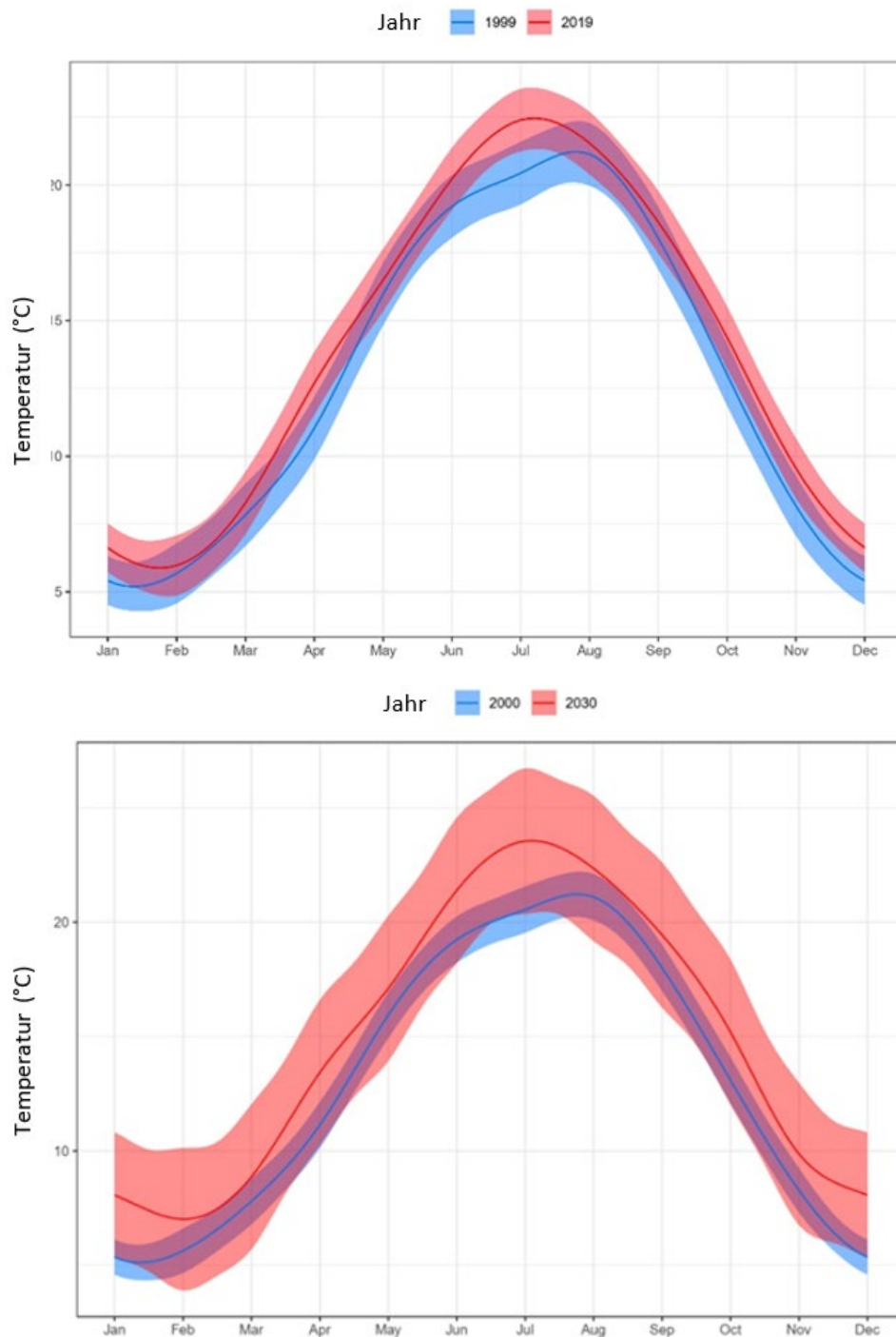


Abb. 17. Modellierte Durchschnittstemperaturen für die belgische und die niederländische Maas im Jahresverlauf für die Bezugsjahre 1999/2019 und 2000/2030. Die Standardabweichung wird als Farbstreifen dargestellt.

Da die gleiche Modellrechnung Prognosen für die monatliche Durchschnittstemperatur für jedes Jahr des betreffenden Zeitraums liefern kann, können die Prognosen für den gesamten Zeitraum monatlich oder pro Saison vorgelegt werden. Die letztgenannte Präsentation findet sich in Abbildung 18.

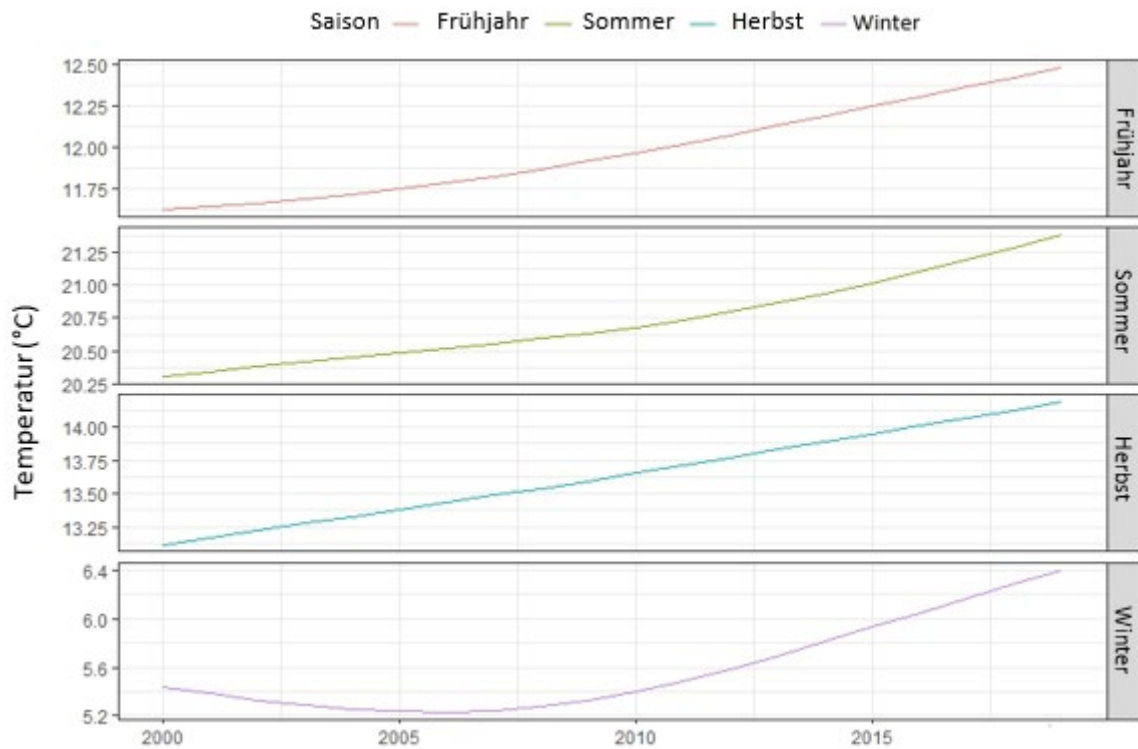


Abb. 18. Entwicklung der nach Jahreszeiten gemittelten modellierten Temperaturen für die belgische und die niederländische Maas in den Bezugsjahren 1999/2019.

Entwicklung der jährlichen Mindest- und Höchsttemperaturen pro Standort

Abb. 19 fasst die Entwicklung der jährlichen Mindestwerte für jeden der vier überwachten Standorte zusammen und Abb. 20 die Entwicklung der Höchstwerte.

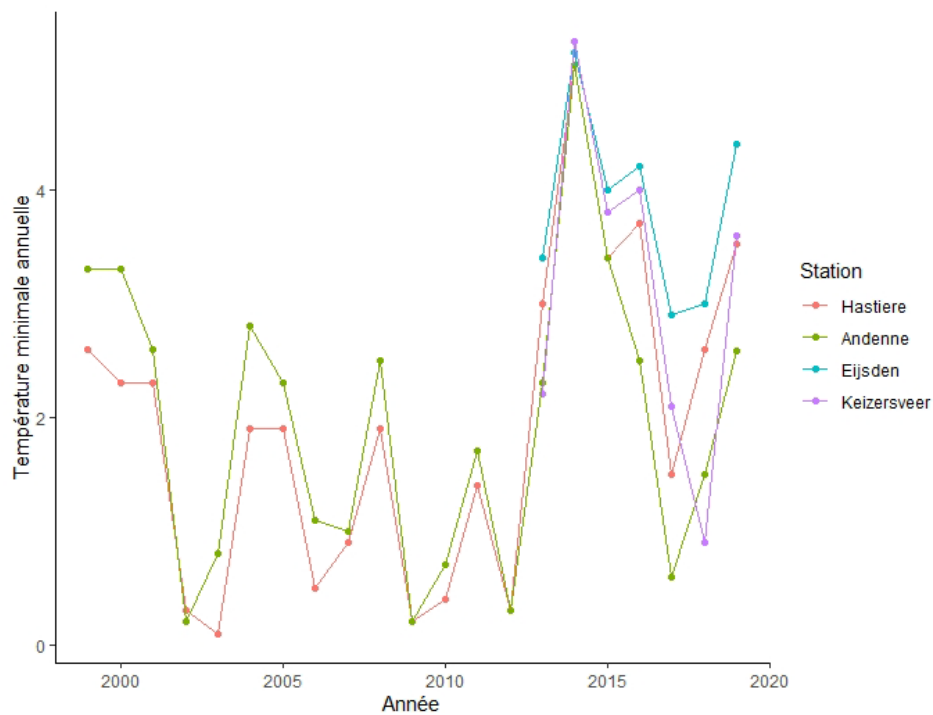


Abb. 19. Jährliche Mindesttemperaturen an vier Maas-Standorten für den Zeitraum 1999-2019.

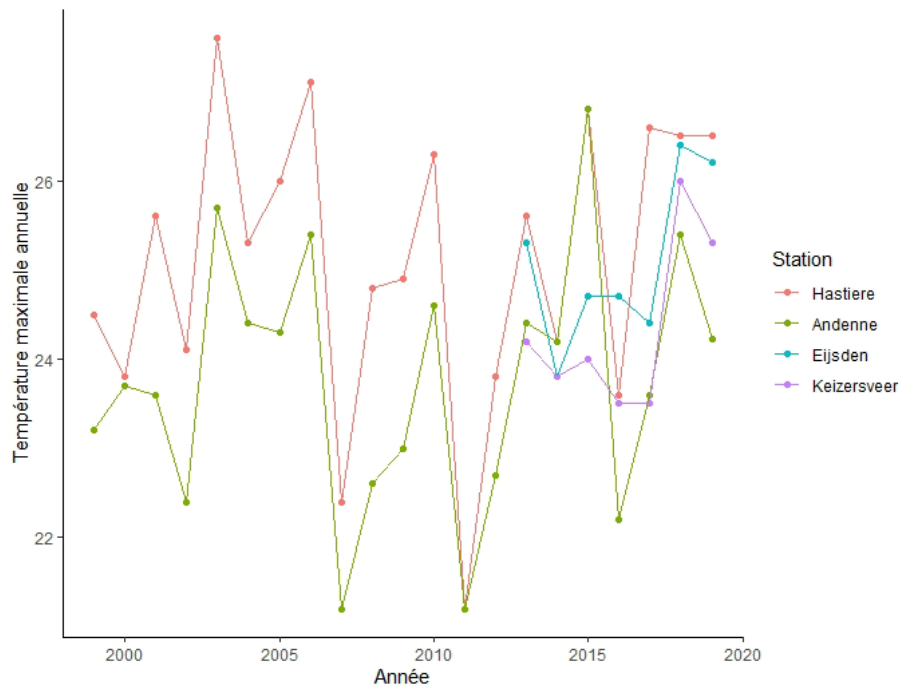


Abb. 20. Jährliche Höchsttemperaturen an vier Maas-Standorten für den Zeitraum 1999-2019.

Entwicklung der jährlichen Mindest- und Höchsttemperaturen für alle Standorte

Die Entwicklung der Mindest- und Höchsttemperaturen für alle Standorte wird in Abb. 21 bzw. 22 zusammengefasst.

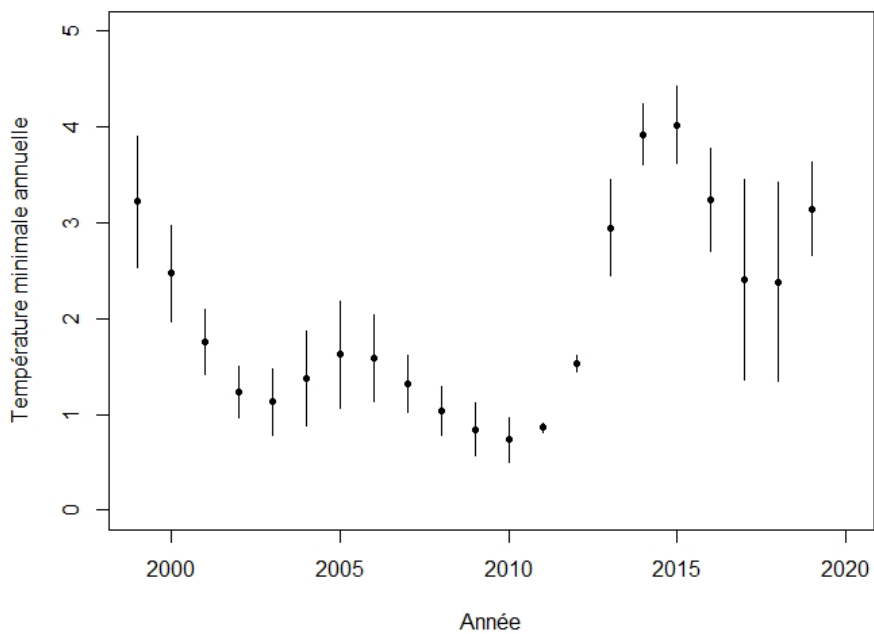


Abb. 21. Jährliche Mindesttemperaturen an allen Standorten der Maas für den Zeitraum 1999-2019.

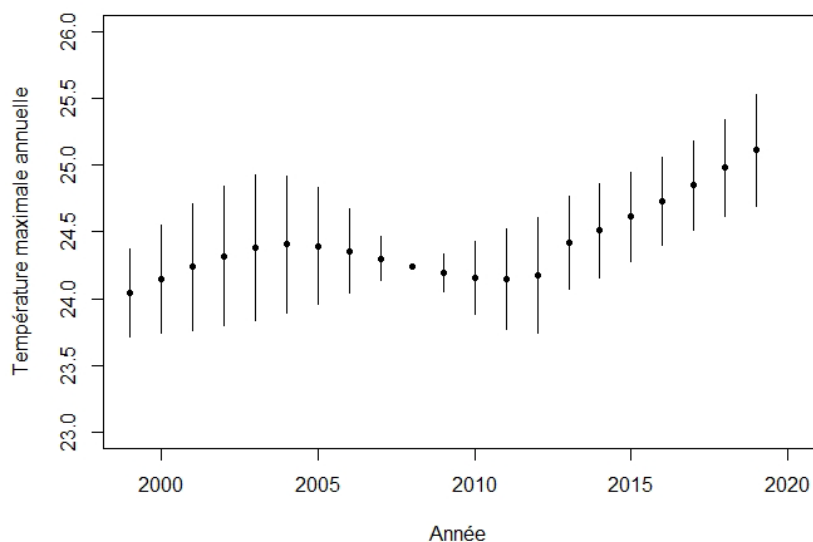


Abb. 22. Jährliche Höchsttemperaturen an allen Maas-Standorten für den Zeitraum 1999-2019.

Hohe Wassertemperaturen können sich negativ auf die Wasserfauna auswirken, insbesondere aufgrund der verminderten Sauerstofflöslichkeit. Daher erschien es interessant, in der nachstehenden Tabelle die Anzahl der Tage im Jahr zusammenzufassen, an denen die Maas an allen Standorten eine Temperatur von mehr als 25 °C, eine für unsere Regionen und einen Fluss wie die Maas bereits hohe Temperatur, aufweist.

Stationen	2001	2003	2004	2005	2006	2010	2013	2015	2017	2018	2019	Summe
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
Summe	2	20	6	7	25	10	14	5	4	49	17	159

Diskussionen und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Analyse der verfügbaren Daten an 4 belgisch-niederländischen Standorten zeigen, dass die Temperatur der Maas zwischen 1999 und 2019 um nahezu 1 °C deutlich gestiegen ist (Abbildung 23). Dieser Temperaturanstieg ist auf globaler Ebene mit geringfügigen Schwankungen zwischen Standorten und Jahreszeiten gut sichtbar. Besonders ausgeprägt ist er für den Zeitraum 2013-2019 (Abb. 23), da das Wasser der Maas höchstwahrscheinlich von den Wetterbedingungen der letzten Jahre beeinflusst wurde.

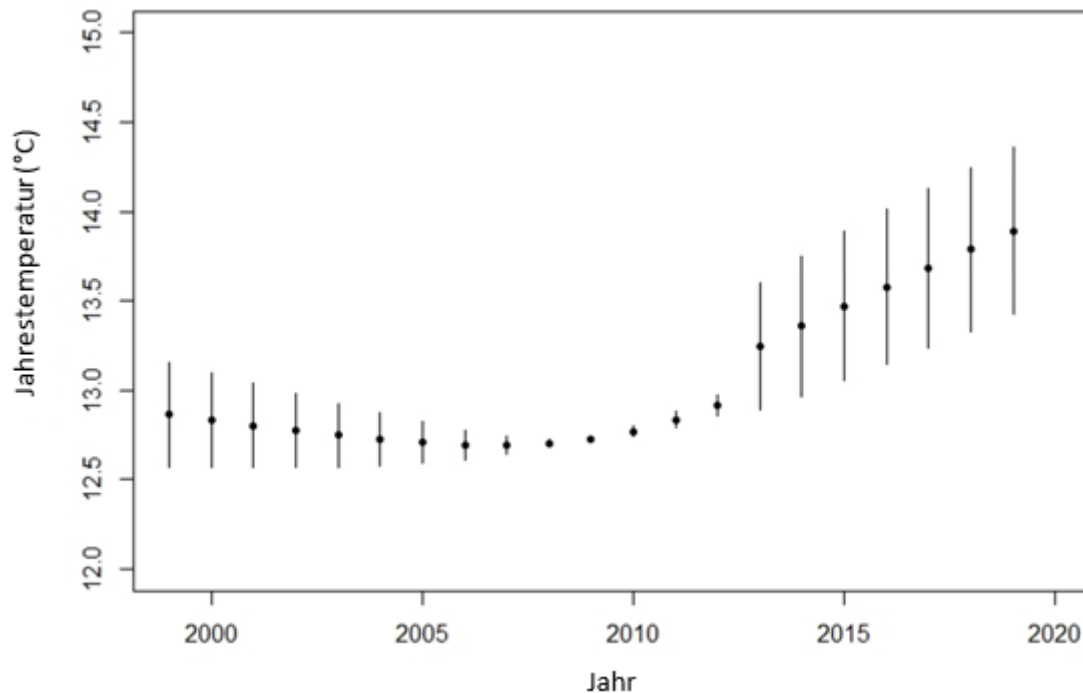


Abb. 23. Entwicklung der jährlichen Temperaturen (°C), die über ein GAM der belgischen und niederländischen Maas im Zeitraum 1999-2019 modelliert wurden. Die Standardabweichung, der in vertikalen Stäben angegeben wird, zeigt die Variabilität zwischen den Standorten.

Zwischen den untersuchten Ländern ($p = 0,06$) besteht kein signifikanter Temperaturunterschied, trotz der insgesamt höheren Temperatur in Eijsden im Vergleich zum Standort Keizersveer ($p < 0,001$) und den anderen wallonischen Messstellen.

Die Hinzufügung der Temperaturdaten dieser Station ist durch die Erhöhung der Standardabweichung für den Zeitraum 2013-2019 (Abbildung 23) sichtbar. Der Standort Keizersveer könnte für die Beschleunigung des Temperaturanstiegs ab den 2010er Jahren verantwortlich sein. Die Nutzung niederländischer Daten über einen längeren Zeitraum könnte dazu beitragen, die vorgeschlagene Modellierung zu verfeinern und verlässliche Prognosen für künftige Jahre vorzulegen. Die für die Jahre nach 2019 vorgeschlagenen Modelle sind nach wie vor sehr umstritten und ziemlich unsicher (sehr signifikante Standardabweichung).

Die Entwicklung der Temperatur innerhalb der Jahreszeiten wurde nicht statistisch untersucht, aber es ist graphisch erkennbar, dass die Durchschnittstemperatur der Maas im Frühjahr tendenziell rascher ansteigt, um in der Sommerperiode Höchstwerte zu erreichen. Auch die Temperaturen im Winter sind tendenziell weniger niedrig. Der geringe Temperaturrückgang im



Herbst, der nur in den Niederlanden beobachtet wurde, könnte lediglich auf die geringe Anzahl verfügbarer Daten zurückzuführen sein.

Da durch die Hinzufügung der niederländischen Daten zu den wallonischen Daten das Konfidenzintervall der Prognosen verringert wurde, dürfte die künftige Hinzufügung neuer Daten, einschließlich französischer Daten, dessen weitere Einschränkung und eine Feinabstimmung der Modellierungen ermöglichen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die verfügbaren Daten nach wie vor nicht ausreichen, um verlässliche Prognosen für künftige Jahre zu machen.

An den einzelnen Messstationen der Maas wird die Temperatur von 25 °C im Bezugszeitraum (1999-2019) an 159 Tagen überschritten, davon 68 Tage (nahezu 43 %) allein in den Jahren 2018 und 2019 und 94 Tage (59 %) nur für den Standort Hastière. Durch mehr Daten sollte es möglich sein, n diese letztgenannte Beobachtung eventuell zu bestätigen oder sogar eine Erklärungshypothese vorzulegen.

Quellenverweise

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.