



Ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater van 1978 t/m 2023

Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

Rapport Nr. 301

Disclaimer: uitsluiting van aansprakelijkheid in verband met toegankelijkheid

De ICBR streeft ernaar haar documenten zo toegankelijk mogelijk te maken. Om redenen van efficiëntie is het niet altijd mogelijk om alle documenten in de verschillende talenversies volledig toegankelijk beschikbaar te stellen (bijvoorbeeld met alternatieve teksten voor alle afbeeldingen of in begrijpelijke taal). Het onderhavige rapport bevat mogelijk figuren en tabellen. Voor nadere toelichtingen kunt u contact opnemen met het secretariaat van de ICBR via het telefoonnummer 0049261-94252-0 of per e-mail via sekretariat@iksr.de.

Colofon

Uitgegeven door de:

Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR)
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, 56068 Koblenz, Duitsland
Postbus: 20 02 53, 56002 Koblenz, Duitsland
Telefoon: +49-(0)261-94252-0
Fax: +49-(0)261-94252-52
E-mail: sekretariat@iksr.de
www.iksr.org

Ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater van 1978 t/m 2023

Rapportage: Marieke Frassl (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Duitsland)
Alex Zavarsky (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Duitsland)

Met medewerking van:

Tanja Bergfeld-Wiedemann (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Duitsland)

Pascal Boderie (Deltares, Nederland)

Colet Eggermont (Rijkswaterstaat, Nederland)

Thilo Herold (Bundesamt für Umwelt, Zwitserland)

Sibylle Jacob (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Duitsland)

Carmen de Jong (Université Straßbourg, Frankrijk)

Ulrich Kaul, Thomas Vergers (Bayerisches Landesamt für Umwelt, Duitsland)

Matthias Kremer (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Duitsland)

Mandy Praechter (Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat, Duitsland - voorzitter van de EG STEMP)

Marc Steichen (Administration de la gestion de l'eau, Luxemburg)

Manoj Sanyasee Thapa (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Duitsland)

Carl Love Råman Vinnå (Universität Basel, Zwitserland)

Beate Zedler (Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat, Duitsland)

Vertaling: Dominique Falloux, Fabienne van Harten, Marianne Jacobs, Gwénaëlle Janiaud (Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn, ICBR)

Coördinatie en redactie:

Nikola Livrozet (Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn, ICBR)

Inhoudsopgave

1. Inleiding	4
2. Technische achtergrond	5
2.1 Natuurwetenschappelijke achtergrondinformatie - warmtehuishouding	5
2.2. Tot dusver uitgevoerd onderzoek naar de temperatuur van het Rijnwater	6
3. Continue meting van de watertemperatuur	8
3.1 Meettechniek	8
3.2 Omgang met gegevenslacunes en homogenisering van de tijdreeksen	9
3.3 Tijds kader van de gegevensbasis	9
4. Analyse van de tijdreeksen van de watertemperatuur	12
4.1 Temperatuurontwikkeling in de loop van de Rijn	12
4.2 Frequentieanalyse (extreme waarden)	16
4.3 Trendanalyse	20
4.4 Invloed van grote zijrivieren op de watertemperatuur van de Rijn...	28
4.5 Invloed van grote warmte-emittenten op de watertemperatuur van de Rijn	30
5. Invloed van laagwater op de watertemperatuur	31
6. Conclusies	34
7. Vooruitblik	34
Dankwoord	35
Bibliografie	36
Bijlage: Overzicht van de over- en onderschrijdingsdagen	38

1. Inleiding

De watertemperatuur is een centrale factor in chemische en biologische processen, omdat deze van invloed is op chemische omzettingpercentages en op de voortplanting, groei, ontwikkeling en verspreiding van organismen (ICBR 2013). Mogelijke effecten van gewijzigde watertemperaturen op de aquatische levensgemeenschap worden beschreven in [ICBR-rapport 204](#).

De aanleiding voor het onderhavige rapport is de opdracht van de Rijnministersconferentie om de klimaatadaptatiestrategie van de ICBR voor 2025 te actualiseren. Daarbij ligt de nadruk op het afvoerregime (hoog- en laagwater) en op de watertemperatuur. Als gevolg hiervan heeft de expertgroep "Watertemperaturen" (EG STEMP) de opdracht gekregen om [ICBR-rapport 209](#) over de langjarige ontwikkeling van de watertemperatuur van de Rijn voor eind 2024 te actualiseren.

Sinds de jaren 1970 wordt de watertemperatuur over de volledige loop van de Rijn gemeten en vastgelegd (in bepaalde meetstations wordt er al sinds het begin van de 20^e eeuw regelmatig gemeten). De meetfrequentie was eerst meestal dagelijks. Sinds de opkomst van meetapparatuur die in het water wordt gelaten en de gegevens geautomatiseerd vastlegt, wordt de watertemperatuur op veel plaatsen ook met een hogere temporele resolutie geregistreerd. Naast klimaatinvloeden zijn warmtelozingen, bijvoorbeeld door rioolwaterzuiveringsinstallaties, industrie en elektriciteitscentrales, de belangrijkste factoren die de watertemperatuurhuishouding van de Rijn beïnvloeden.

Sinds het vorige rapport over de ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater op lange termijn (1978-2011) ([ICBR-rapport 209](#)) uit 2013 zijn de belangrijkste beïnvloedende factoren verder veranderd. De warmtelozingen zijn bijvoorbeeld over het geheel genomen verminderd, omdat in Duitsland sinds 2011 tot nu de twee laatste kerncentrales zijn gesloten.¹ Daarnaast is de klimaatverandering verder voortgeschreden, met onder andere een aantoonbare stijging van de gemiddelde luchttemperatuur. In enkele bijzonder warme jaren in het recente verleden zijn er opnieuw recordtemperaturen gemeten in het water. Deze veranderingen en een gefundeerde analyse van de nieuwe trends tot 2023 zijn het onderwerp van het onderhavige rapport.

De toekomstige ontwikkeling in de temperatuur van het Rijnwater wordt beschreven in het rapport "Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development" (publicatie als ICBR-rapport 302 gepland in de lente/zomer van 2025); dit is een actualisering van [ICBR-rapport 214](#). De veranderingen in het afvoerregime van de Rijn worden toegelicht in [ICBR-rapport 297](#). Deze drie rapporten samen geven een totaalbeeld van de warmtehuishouding en de waterhuishouding van de Rijn, met projecties voor de toekomst.

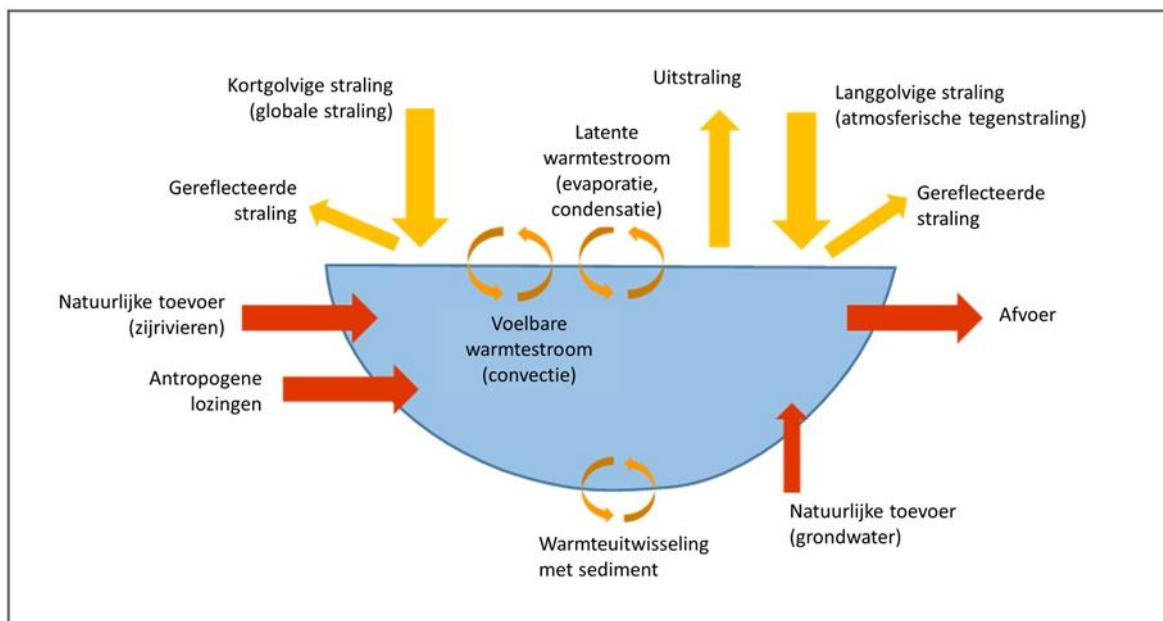
¹ De EG STEMP heeft voor intern gebruikt een inventaris opgemaakt van de warmtelozingen in de periode 2010-2020 (vergunde en daadwerkelijke waarden, > 200 MW).

2. Technische achtergrond

Navolgend wordt als beknopte, natuurwetenschappelijke achtergrondinformatie de warmtehuishouding van oppervlaktewateren uitgelegd en er wordt een overzicht gegeven van eerdere onderzoeken naar de watertemperatuur van de Rijn.

2.1 Natuurwetenschappelijke achtergrondinformatie - warmtehuishouding

De warmtehuishouding van oppervlaktewateren wordt uitvoerig beschreven in de literatuur (bijv. CAISSIE 2006; LAWA 2012; WEBB & ZHANG 1997; WETZEL 2001). Hieronder wordt alleen een korte samenvatting gegeven. De warmtebalans van een rivier wordt door verschillende stralingscomponenten, warmtestromen en warmte-emissies beïnvloed (figuur 1).



Figuur 1: Schematische weergave van de warmtebalans van oppervlaktewateren, die door verschillende stralingscomponenten (geel), warmtestromen (oranje) en warmte-emissies (rood) wordt beïnvloed.

Essentiële warmtetoevoer komt van kortgolvlige straling (globale straling) en langgolvlige straling (atmosferische tegenstraling). Beide componenten worden beïnvloed door de stand van de zon en de bewolking. De langgolvlige straling is ook afhankelijk van de gassenstelling van de atmosfeer, bijvoorbeeld het gehalte waterdamp. Een deel van de invallende straling wordt gereflecteerd, het resterende deel warmt het water op. Afhankelijk van de watertemperatuur straalt de rivier aan het wateroppervlak warmte uit. Verdere opwarming, maar ook afkoeling, kan plaatsvinden via de latente en voelbare warmtestroom en de warmte-uitwisseling met het sediment. Of er warmte wordt aangevoerd of afgegeven hangt af van het verschil tussen de watertemperatuur en de luchttemperatuur (voelbare warmtestroom), het verschil tussen de watertemperatuur en de sedimenttemperatuur (warmte-uitwisseling met het sediment), de windsnelheid (voelbare en latente warmtestroom) en de dampspanning (latente warmtestroom). Een verandering in de watertemperatuur kan ook veroorzaakt worden door directe input uit zijrivieren, grondwater en antropogene lozingen. Afhankelijk van de temperatuur en het volume van deze lozingen, warmt de rivier op of koelt hij af.

2.2. Tot dusver uitgevoerd onderzoek naar de temperatuur van het Rijnwater

In [ICBR-rapport 209](#) wordt een overzicht gegeven van de studies naar de temperatuur van het Rijnwater die tot 2013 zijn gepubliceerd (tabel 1). De uitgevoerde analyse wordt als volgt samengevat:

- Er bestaat een correlatie tussen de gemeten watertemperaturen en de gemeten luchttemperatuur.
- Bepaalde bijzonder warme gebeurtenissen vallen op in de ontwikkeling op lange termijn, zoals de zomers van 2003 en 2006.
- Er is een opwarmingstrend zichtbaar over de geanalyseerde periode, maar deze is niet-lineair.
- De opwarming door warmtelozingen is regionaal beperkt waarneembaar.
- De grote zijrivieren Neckar, Main en Moezel hebben in de herfst- en wintermaanden een veeleer afkoelend effect.
- In het afgelopen decennium is een aanzienlijke toename van de overschrijding van de bekeken drempelwaarden van 22 °C en 25 °C waargenomen.
- Door de sluiting van verschillende kerncentrales zal de temperatuurstijging naar verwachting afnemen.

Tabel 1: Samenvatting van gerapporteerde jaargemiddelden en opwarmingstrends ([ICBR-rapport 209](#))

Station	Rivierkilometer	Referentieperiode	Gemiddelde	Trend	Soort evaluatie	Bron
Kehl	292,2	1850–1859	10,9 °Re (13,6 °C)		Gemiddelde over 10 jaar	ICBR 2013
Freiburg	ca. 220,0	1889–1892	10,8 °Re (13,5 °C)		Gemiddelde over 4 jaar	FORSTNER 1894 (ICBR 2013)
Speyer	400,6	1889–1892	10,2 °Re (12,8 °C)			FORSTNER 1894 (ICBR 2013)
Maxau	362,3	1951–1960	11,8 °C		Gemiddelde van dagelijkse, individuele metingen	WUNDT 1940 & 1967 (ICBR 2013)
Kaub	546,3	1946–1960	11,1 °C			WUNDT 1940 & 1967 (ICBR 2013)
Rees	837,4	1951–1960	11,2 °C			WUNDT 1940 & 1967 (ICBR 2013)
Bazel	164,3	1954–2003		> 2 °C		BUWAL 2004 (ICBR 2013)
Bimmen	865,0	1977–2012		> 1 °C		MUNLV 2009 (ICBR 2013)
Lobith	862,2	1908–2000		> 3°C		LIEFVELD & POSTMA 2007 (ICBR 2013)
Rekingen	90,7	1978–2011		1,7 °C	Mann Kendall trend test, jaargemiddelde	ICBR 2013
Mainz	498,5	1978–2011		1,3 °C		ICBR 2013
Koblenz	590,3	1978–2011		1,2 °C		ICBR 2013

Hieronder wordt er gekeken naar onderzoeken die na 2013 zijn gepubliceerd. In meerdere onderzoeken gaat het specifiek om afzonderlijke, klimatologisch bijzondere jaren (BFG 2021; SCHWANDT et al. 2019) of om de simulatie van opwarmingstrends als gevolg van klimaatverandering (HARDENBICKER et al. 2017; MANNFELD & FISCHER 2020; VINNÅ et al. 2023).

In het BfG-rapport over de laagwatersequentie van de jaren 2015–2018 (BFG 2021) zijn de twee stations Koblenz en Lobith bekeken. De meetgegevens van de laagwatersequentie 2015–2018 werden vergeleken met het 10-jarig gemiddelde over de jaren 2005–2014. De nadruk lag op effecten die optreden tijdens laagwater, zoals bijvoorbeeld de sterkere opwarming van het water, omdat de invallende straling een relatief kleiner watervolume verwarmt. In deze analyse viel het bijzonder warme jaar 2018 op, waarin de temperatuur gedurende meerdere maanden bijna continu boven het langjarige gemiddelde lag. In andere jaren lag de watertemperatuur in de herfst (2016) en in de vroege lente/de vroege zomer (2017) boven het langjarige gemiddelde. Een vergelijking van de watertemperaturen gerelateerd aan het voorkomen van laagwater in de zomer toonde voor de Rijn een lichte tendens naar hogere temperaturen bij laagwater, hoewel de gemiddelde watertemperatuur tijdens laagwater in het station Koblenz iets lager was dan in de referentie. Er was geen algemene correlatie tussen de maandgemiddelde watertemperatuur en de afvoer. De auteurs concluderen hieruit dat laagwater niet leidt tot een stijging van de watertemperatuur, maar deze wel bevordert.

Afzonderlijke extreem warme jaren werden ook geanalyseerd als onderdeel van de laagwatersequentie 2018–2020 voor het station Koblenz (SCHWANDT et al. 2019).

Volgens deze studie kwam de daggemiddelde watertemperatuur in 2018 op 31 dagen boven de 25 °C uit. Deze waarde werd alleen in de zeer warme zomer van 2003 overschreden, met 38 dagen boven de 25 °C (SCHWANDT et al. 2019).

In verschillende studies zijn de toekomstige ontwikkelingen in de watertemperatuur van de Rijn als gevolg van de klimaatverandering onderzocht. Voor het traject van Karlsruhe tot Bimmen werd een geprojecteerde, gemiddelde opwarming van -0,2 °C tot +1,8 °C berekend voor de nabije toekomst (2021-2050) en van +0,4 °C tot +3,4 °C voor de verre toekomst (2071–2100) (HARDENBICKER et al. 2016). Deze studie gebruikte gemeten watertemperaturen van 2000 en 2008 om het model te valideren. Hetzelfde riviertraject werd in een later onderzoeksproject met recentere klimaatinvloedgegevens geanalyseerd (MANNFELD & FISCHER 2020). Daarbij werden de volgende opwarmingstrends berekend: +1,1 °C tot 2,2 °C voor de nabije toekomst (2031–2060) en +2,7 °C tot 3,8 °C voor de verre toekomst (2070–2099).

Voor Zwitserland werd de verwachte verandering van de watertemperatuur berekend met behulp van een semi-empirische modelbenadering (VINNÅ et al. 2023). Het model werd gekalibreerd aan de hand van gemeten watertemperaturen van 1990–2020. Voor de Rijn werden er zeven stations geanalyseerd en de respectievelijke verwachte veranderingen tussen de referentie (1990–2019) en de nabije toekomst (2030–2059) of de referentie en de verre toekomst (2070–2099) werden voor verschillende indices bekeken. Voor twee Rijnstations is de op basis van metingen geprojecteerde opwarmingstrend voor de periode 1990–2019 weergegeven (tabel 2).

Tabel 2: Op basis van metingen berekende opwarmingstrends voor twee Zwitserse Rijnstations voor de periode 1990–2019 (VINNÅ et al. 2023)

Trend (°C/decennium)	Lente	Zomer	Herfst	Winter
Rheinau (Oberwasser)	0,18 °C	0,58 °C	0,54 °C	0,23 °C
Diepoldsau, Rietbrücke	0,20 °C	0,38 °C	0,31 °C	0,11 °C

Het samenwerkingsverband "water" van de Duitse deelstaten en de Duitse Bond (LAWA) heeft zich zeer uitgebreid beziggehouden met koelwaterlozingen op oppervlaktewater, en in een handreiking zowel de belangrijkste oorzaken van veranderingen in de

watertemperatuur als de effecten van een temperatuurverandering op de aquatische ecologie beschreven (LAWA 2013).

Het effect van warmtelozingen door elektriciteitscentrales en andere industriële lozers op de watertemperatuur van de Rijn is onderzocht door ZAVARSKY & DÜSTER (2020). Er werd een regressiemodel gebruikt om de natuurlijke drijvende krachten achter watertemperatuurveranderingen te scheiden van de antropogene drijvende krachten. De studie gebruikte gegevens van de stations Bazel, Worms, Koblenz en Keulen. Naast de opwarming van de luchttemperatuur werden in de studie ook effecten vastgesteld van de afnemende warmtelozingen van kerncentrales en werden kortstondige veranderingen in de watertemperatuur gecorreleerd met industriële productieparameters.

Het onderhavige rapport houdt verband met de ICBR-rapporten [297](#) en 302 (publicatie staat gepland voor de lente/zomer van 2025) over het onderzoek naar toekomstige veranderingen in de waterhoeveelheid en de watertemperatuur. Naast de projectie van toekomstige watertemperaturen wordt in het laatste rapport ook ingegaan op het effect van warmtelozingen op de Rijn. De berekeningen laten een gemiddelde opwarming zien tussen 0,5 °C en 1 °C. Het effect van een veranderde watertemperatuur op de biologie is samengevat in [ICBR-rapport 204](#), dat eveneens voor medio 2025 zal worden geactualiseerd.

3. Continue meting van de watertemperatuur

Hieronder wordt er ingegaan op de techniek voor temperatuurmeting, de omgang met gegevenslacunes, het homogeniseren van tijdreeksen en het tijds kader van de beschikbare gegevensbasis.

3.1 Meettechniek

De watertemperatuur wordt in de regel gemeten door middel van een elektrische weerstandsmeting. Hiervoor worden weerstandsthermometers zoals Pt100 of Pt1000 gebruikt. Dit zijn platina weerstanden die hun elektrische weerstand veranderen afhankelijk van de temperatuur. Er bestaan gestandaardiseerde functies die de gemeten weerstand omzetten in een temperatuur. Dit gebeurt echter automatisch in de gangbare meetsystemen. In typische gevallen wordt hier een absolute nauwkeurigheid van 0,1 °C bereikt. De relatieve nauwkeurigheid, d.w.z. wanneer de temperatuur verandert, is meestal beter. Voor de analyses in deze studie volstaat deze nauwkeurigheid. De exacte meetuitrusting van de stations is niet bekend, maar de hierboven beschreven techniek is al tientallen jaren standaard en wordt in de meeste meetsystemen geïnstalleerd.

Bij metingen van rivierwater wordt een onderscheid gemaakt tussen ex-situ- en in-situmetingen. In-situmetingen zijn metingen die direct in de rivier worden uitgevoerd. Ex-situmetingen zijn metingen van rivierwater dat daarvoor aan een rivier is onttrokken. Dit gebeurt meestal met behulp van een pompsysteem. Deze mogelijke invloed moet voor elk afzonderlijk meetstation worden onderzocht en is locatie-afhankelijk. Aangenomen wordt dat de meetstations zorgvuldig worden beheerd en dat er geen noemenswaardige afwijkingen zijn als gevolg van het meetproces. De plaatsing en ligging van de meet- en bemonsteringspunten zijn veel belangrijker. De temperatuurverdeling in de rivier kan zeer heterogeen zijn, zowel in de diepte (verticaal) als in de breedte (horizontaal). Veranderingen in de positie kunnen leiden tot significante temperatuurveranderingen. Aangenomen wordt dat een meet- of bemonsteringspunt, indien het vastgesteld en niet veranderd wordt, een goede beschrijving geeft van de temperaturomgeving en de

temperatuurveranderingen. Het meetpunt is een proxy² voor de warmtehuishouding van de rivier (Rijn) op deze locatie. Daarom is het belangrijk dat meetpunten onveranderd blijven. Als de meetreeks coherent is, kan deze worden gebruikt om veranderingen in de warmtehuishouding te analyseren. Dit geldt niet als er sprake is van lokale warmtelozingen in de omgeving van het meetpunt. In dat geval moet er een individuele beoordeling worden uitgevoerd.

Om de problemen in verband met de bovengenoemde punten te vermijden, worden in dit rapport waar mogelijk temperatuurveranderingen beschreven in plaats van absolute temperaturen. Bij het vergelijken van meetstations met elkaar is het zinvoller om de veranderingen in het verschil te analyseren, aangezien de absolute temperatuurniveaus van de stations onderling sterk kunnen verschillen.

3.2 Omgang met gegevenslacunes en homogenisering van de tijdreeksen

De aggregatie van de oorspronkelijke gegevens is weergegeven in tabel 3. Meestal gaat het om één dag, terwijl de metingen veelal continu met een hogere frequentie worden uitgevoerd. Voor de analyses werden de gegevens gemiddeld tot jaarwaarden. Ontbrekende gegevens tot twee weken werden geïnterpoleerd. Een uitzondering is de gegevensreeks voor Bimmen/Lobith, waarin tot 30 dagen werden geïnterpoleerd. De reden hiervoor is dat de lacune in de overgangperiode in het voorjaar viel en er een continue verandering in de watertemperatuur kan worden verwacht. De gegevensreeks van Lobith (1911–2011) werd met de gegevensreeks van Bimmen (2005–2023) verlengd tot 2023. De twee meetstations liggen slechts 2,7 km van elkaar vandaan (tabel 3) en in de overlappende periode 2005–2011 kon voldoende overeenstemming tussen de meetwaarden worden aangetoond, hetgeen deze aanpak rechtvaardigt.

3.3 Tijds kader van de gegevensbasis

Dankzij de verbeterde beschikbaarheid van gegevens sinds het vorige rapport is de database opnieuw aanzienlijk uitgebreid (tabel 3). Dit betekent dat trends op lange termijn betrouwbaarder kunnen worden berekend en ontwikkelingen op lange termijn beter kunnen worden ingeschat. Het station Bimmen/Lobith heeft de langste tijdreeks (metingen sinds 1911). Een groot deel van de metingen in de stations begint rond 1970. Inmiddels zijn er voor veel stations dagelijkse gegevens en gegevens met een hogere temporele resolutie beschikbaar (tabel 3). De meetlocatie Düsseldorf-Flehe is na 2011 buiten werking gesteld en wordt in het onderhavige rapport buiten beschouwing gelaten. Voorts werd de meetfrequentie in het station Lobith verlaagd, wat werd ondervangen door de gegevensreeksen van de stations Lobith en Bimmen samen te voegen (hoofdstuk 2.2).

Stations in de Alpenrijn (Rijn bovenstrooms van het Bodenmeer, figuur 2) en in het Bodenmeer werden niet meegenomen. Wat de warmtehuishouding en de watertemperatuur betreft gedraagt het Bodenmeer zich anders dan rivieren. Met een gemiddelde diepte van 90 meter heeft het meer vanwege het zeer grote volume een grotere inertie voor temperatuurveranderingen en vanwege de vermenging en stratificatie (anomalie van water) een heel andere dynamiek dan rivieren. De Alpenrijn wordt van de Hoogrijn gescheiden door het Bodenmeer. De verblijftijd van het water in het Bodenmeer is zo lang dat de twee Rijntrajecten losgekoppeld zijn elkaar en afzonderlijk kunnen worden bekeken.

² Een proxy, ook "plaatsvervanger", is een indirecte factor die zich op dezelfde manier gedraagt als de eigenlijke factor die moet worden bepaald.

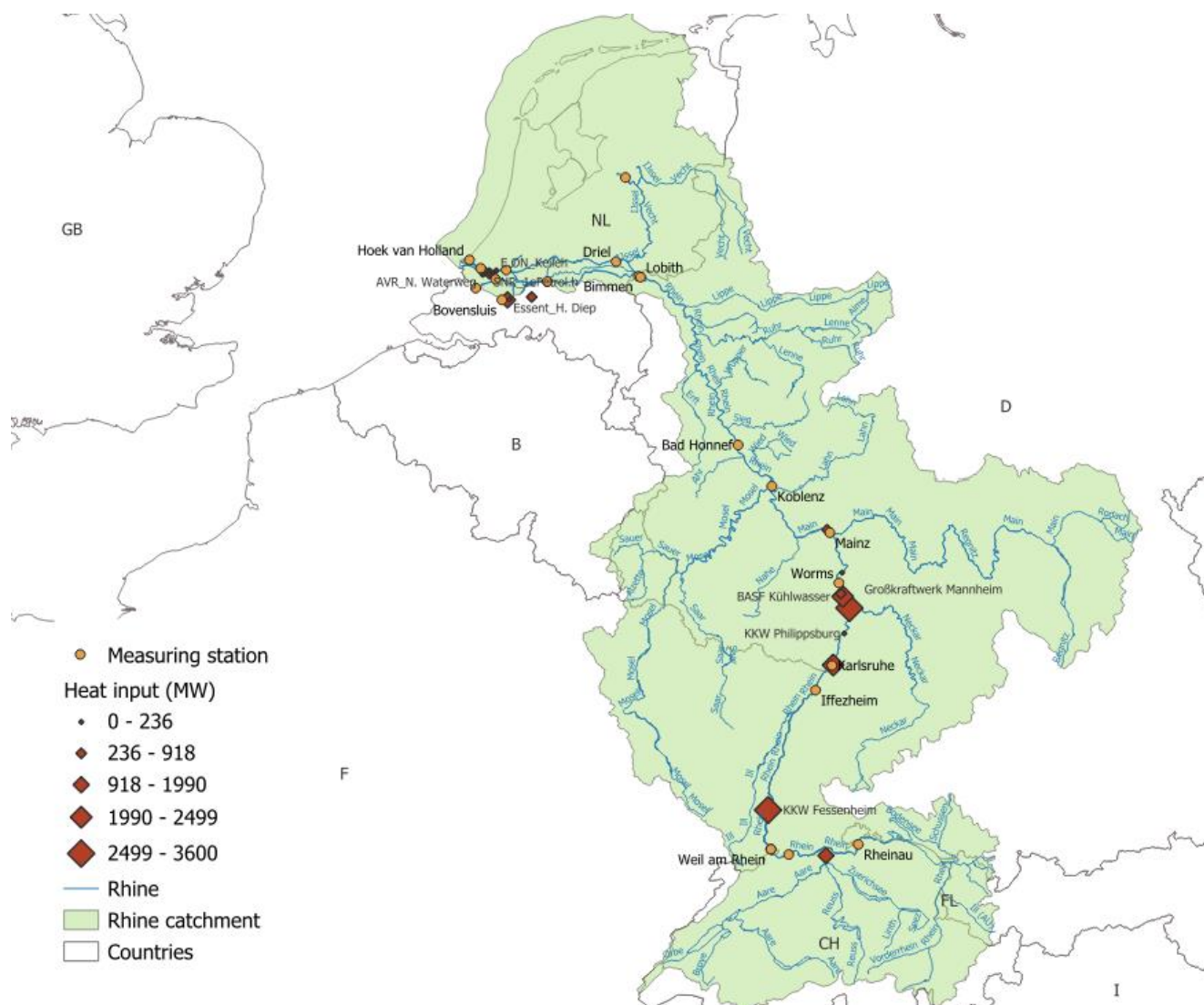
Tabel 3: Overzicht van de tijdreeksen van de watertemperatuur

Meetlocaties	Rivier	Rivier-kilometer	Tijdspanne ****	Gegevens- basis analyse	Bron	Analyses
Neuhausen	Rijn	47	2009–2023	dagelijks	BAFU	1, 2
Rheinau	Rijn	56	1971–2023	dagelijks	BAFU	1, 2
Rekingen*	Rijn	90,7	1969–2023	dagelijks	BAFU	1, 2, 3
Laufenburg	Rijn	123	1970–2023	dagelijks	BAFU	1, 2
Rheinfelden (CH)	Rijn	149	1970–2023	dagelijks	BAFU	1, 2
Bazel (<i>Weil am Rhein</i> *)	Rijn	174	1977–2023	dagelijks	BAFU, LUBW	1, 2, 3
Iffezheim	Rijn	334	1992–2023	dagelijks	LUBW	1, 2
Karlsruhe*	Rijn	359,2	1988–2023	dagelijks	LUBW	1, 2
Mannheim	Rijn		1975–2023	om de 14 dagen	LUBW	4
Worms	Rijn	443,3	1971–2023	dagelijks	LfU RLP	1, 2, 3
Mainz	Rijn	498,5	1980–2023	dagelijks	LfU RLP	1, 2, 4
Koblenz, Rijn*	Rijn	590,3	1978–2023	dagelijks	de BfG	1, 2, 3, 4
Bad Honnef	Rijn	640	2004–2023	dagelijks	LANUV	1, 2
Keulen	Rijn		1985–2023	dagelijks	WSV	1, 2, 3
Düsseldorf-Flehe	Rijn	732,2	2004–2011	dagelijks	LANUV	
Lobith*	Rijn	862,3	1911–2011	dagelijks	RWS	1, 2
Lobith*	Rijn	862,3	1990–2022	om de 14 dagen	RWS	
Bimmen	Rijn	865	2005–2023	dagelijks	LANUV	2
Bimmen*	Rijn	865	1978–2022	om de 14 dagen	ICBR	1
Bimmen/Lobith**	Rijn		1911–2023	dagelijks		2, 3
Amerongen (1 m)***	Rijn, Nederrijn-Lek	975	1990–1992	maandelijks	RWS	
Amerongen (3 m)***	Rijn, Nederrijn-Lek	975	2001–2023	dagelijks	RWS	1, 2
Kampen	Rijn, IJssel	992	2000–2021	maandelijks	RWS	1
Brienoordbrug	Rijn, Nieuwe Maas	995,2	2000–2021	maandelijks	RWS	1
Beerenplaat (2 m)***	Rijn, Oude Maas	996,1	1994–2022	dagelijks	RWS	1, 2
Middelharnis (2 m)***	Rijn, Haringvliet	1.005	2006–2021	dagelijks	RWS	1, 2
Hoek van Holland (2.5 m)***	Rijn, Nieuwe Waterweg	1.030,1	1999–2021	dagelijks	RWS	1, 2
Bovensluis	Rijn, Haringvliet		1991–2021	maandelijks	RWS	

Hollandsch Diep (mond Dordtsche Kil west)	Rijn, Hollands Diep		2010-2021	maandelijks	RWS	
Brienoordbrug rechteroever	Rijn, Nieuwe Maas		1999-2021	dagelijks	RWS	
Maassluis	Rijn, Nieuwe Waterweg		1990-2021	om de 14 dagen	RWS	
Puttershoek	Rijn, Oude Maas		1990-2021	maandelijks	RWS	
Koblenz, Moezel*	Moezel	2	1978-2022	dagelijks	de BfG	4
Mannheim, Neckar	Neckar	3	1985-2023	dagelijks	LUBW	4
Bischofsheim	Main	4	2004-2023	dagelijks	HLNUG	4

Legenda:

- * Internationale hoofdmeetlocaties van het ICBR-Rijnmeetprogramma chemie
- ** Samenvoeging van de gegevensreeksen van Lobith en Bimmen (hoofdstuk 2.2)
- *** Meetdieptes van de stations in meter
- **** De hier aangegeven tijdspanne omvat de complete jaren van de tijdreeksen, deels beginnen de metingen iets vroeger/later
- 1 Analyse van de temperatuurontwikkeling in de loop van de Rijn en "climate stripes" (hoofdstuk 3.1)
- 2 Analyse van de overschrijding van drempelwaarden (hoofdstuk 3.2)
- 3 Trendanalyse (hoofdstuk 3.3)
- 4 Vergelijking van de watertemperatuur van grote zijrivieren met de watertemperatuur van de Rijn



Figuur 2: Rijnstroomgebied (groen) met de meetstations voor watertemperatuur (oranje stippen) en de vergunde warmtelozingen (2020) op de Rijn (rood). Bron: Deltares (2024) in ICBR-rapport 302 (publicatie hiervan staat gepland voor de lente/zomer van 2025)

4. Analyse van de tijdreeksen van de watertemperatuur

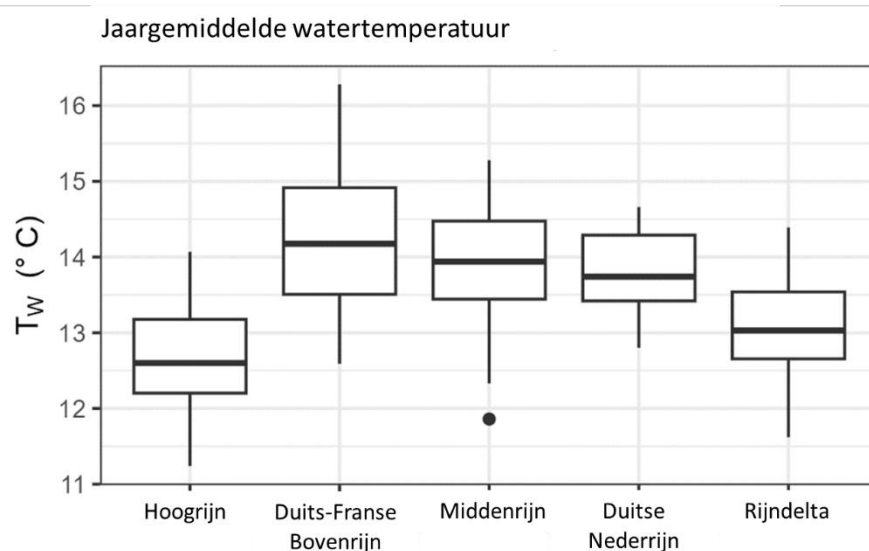
De tijdreeksen van de watertemperatuur worden geanalyseerd op basis van een aantal factoren.

4.1 Temperatuurontwikkeling in de loop van de Rijn

Om de ontwikkeling van de watertemperaturen in de loop van de Rijn te analyseren, zijn voor elk Rijntraject de jaargemiddelde watertemperaturen voor de jaren 2009–2021 geaggregeerd (figuur 3). De Hoogrijn (van het Bodensee tot Bazel) wordt gekenmerkt door relatief koude watertemperaturen (gemiddelde: 12,6 °C). De Duits-Franse Bovenrijn (van Bazel tot Bingen³) heeft de hoogste jaargemiddelde temperaturen (gemiddelde: 14,3 °C). Dit kan aan verschillende factoren worden toegeschreven. De Duits-Franse Bovenrijn ligt in een klimatologisch relatief warme regio. Bovendien wordt de

³ Ten noorden van Mainz

stroomsnelheid in de Duits-Franse Bovenrijn verlaagd door stuwen, waardoor het water meer tijd heeft om op te warmen. In de Duits-Franse Bovenrijn is ook het effect van warmtelozingen op de Rijn zichtbaar. Dit effect kan ook worden gemeten op de volgende twee trajecten, te weten de Middenrijn (van Bingen tot Keulen) en de Duitse Nederrijn (van Keulen tot Lobith) (gemiddelden: 13,9 °C en 13,8 °C), waar de watertemperatuur over het algemeen echter afneemt. Richting de monding van de Rijn, in de Rijndelta (van Lobith tot Hoek van Holland), koelt de Rijn verder af (gemiddelde: 13,1 °C). Daar wordt de Rijn gedeeltelijk beïnvloed vanuit de zee.



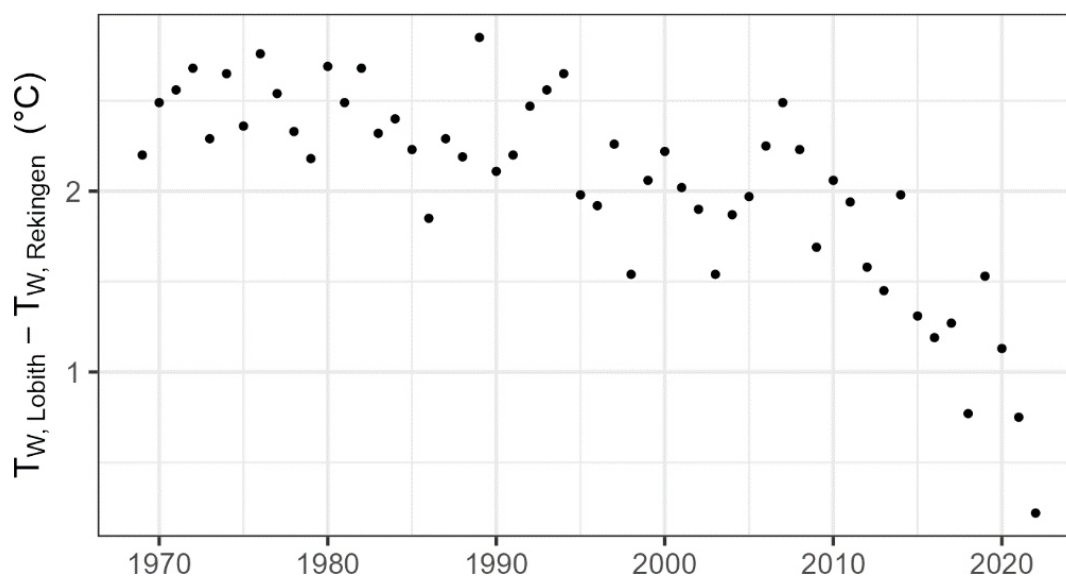
Figuur 3: Jaargemiddelde temperaturen (2009–2021) in de loop van de Rijn. Hoogrijn: van het Bodenmeer tot Bazel, Duits-Franse Bovenrijn: van Bazel tot Bingen, Middenrijn: van Bingen tot Keulen, Duitse Nederrijn: van Keulen tot Lobith, Rijndelta: van Lobith tot Hoek van Holland. De onder- en de bovenkant van de box zijn respectievelijk het 25- en het 75-percentiel, de zwarte lijn in de box is de mediaan, de stip is een uitschieter (hier: jaargemiddelde van het station Keulen, 2021).

Van het eerste station (Neuhausen) tot het laatste station (Hoek van Holland) stijgt de jaargemiddelde watertemperatuur in de periode 2009-2021 gemiddeld met 0,4 °C, maximaal met 1,1 °C en minimaal met -0,4 °C (afkoeling) (tabel 4). Dit afkoelende effect kan echter ook worden veroorzaakt door de invloed van de zee in het station Hoek van Holland. Tussen de stations Rekingen en Lobith schommelt de opwarming tussen 0,22 °C en 2,9 °C met een gemiddelde opwarming van 2,0 °C. Opvallend is dat er vooral in de laatste tien jaar kleinere temperatuurverschillen tussen deze twee stations worden waargenomen (figuur 4). Dit komt waarschijnlijk door de sterkere opwarmingstrend in Rekingen (hoofdstuk 3.1).

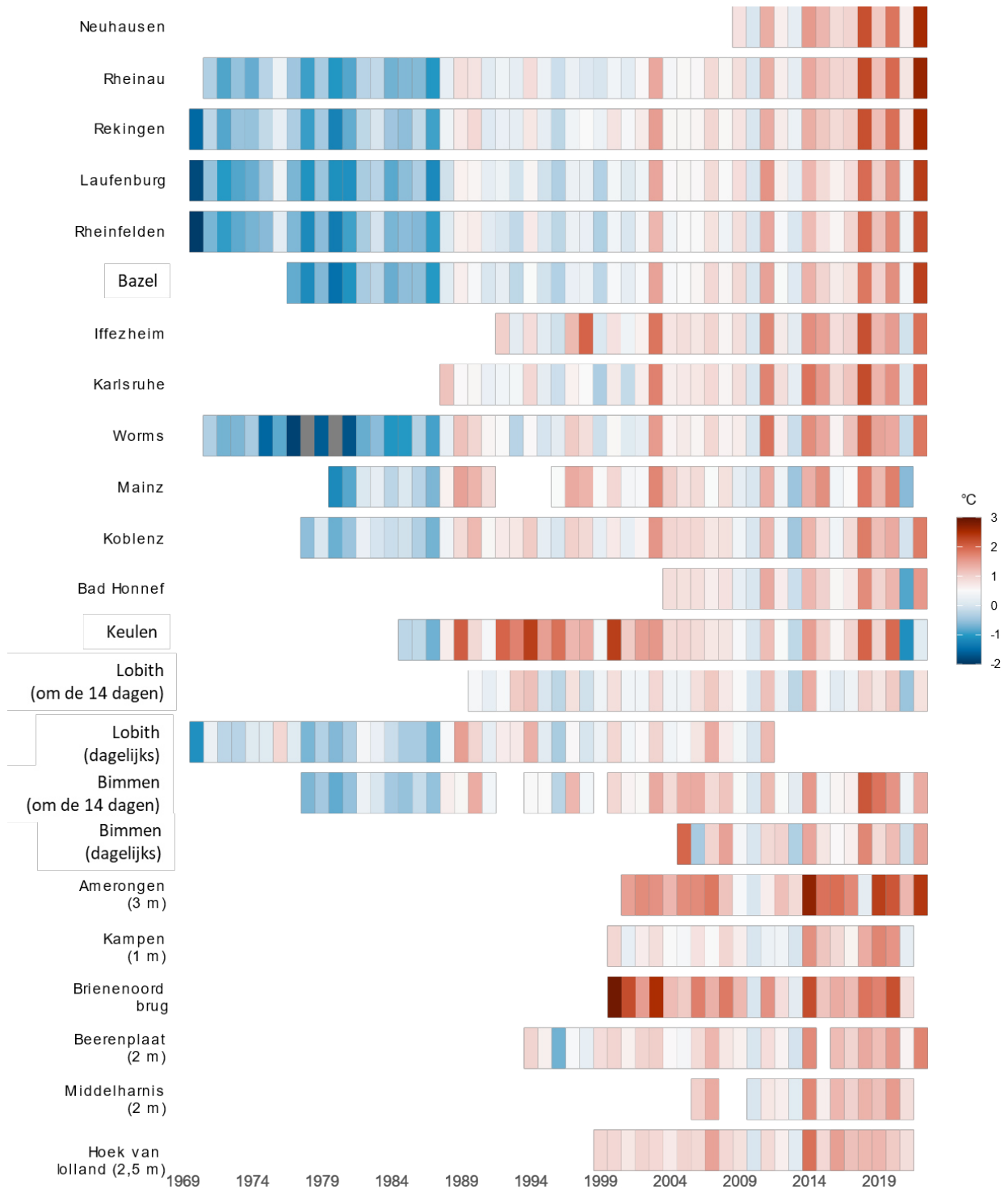
Over het geheel genomen zijn de temperatuurverschillen tussen de stations vergelijkbaar met [ICBR-rapport 209](#) (tabel 1).

Tabel 4: Temperatuurverschil tussen de jaargemiddelden van de twee per rij genoemde meetstations

Traject	Periode	Gemiddelde (°C)	Minimum (°C)	Maximum (°C)
Neuhausen-Hoek van Holland	2009–2021	0,4	-0,4	1,1
Rekingen-Lobith	1969–2022	2,0	0,2	1,1
Rekingen-Karlsruhe	1988–2023	1,3	0,6	2,1
Karlsruhe-Mainz	1988–2023	1,2	0,5	2,1
Karlsruhe-Worms	1988–2023	1,6	0,7	2,3
Mainz-Koblenz	1980–2023	-0,4	-1,1	0,3
Koblenz-Bad-Honnef	2004–2023	-0,4	-1,1	0,0
Bad Honnef-Keulen	2004–2023	-0,3	-1,7	0,5
Keulen-Lobith	1985–2022	-0,1	-1,9	1,1
Lobith-Amerongen	2001–2022	-0,8	-2,5	0,1

**Figuur 4:** Verschil tussen de jaargemiddelde watertemperaturen (Lobith-Rekingen)

Om de relatieve verandering te berekenen, werd voor elk station het verschil bepaald tussen de jaargemiddelde temperatuur van elk jaar en de jaargemiddelde temperatuur van 2010 (figuur 5). Het jaar 2010 werd gekozen als referentiejaar, omdat er voor dit jaar op alle stations metingen voor het hele jaar beschikbaar zijn. De relatieve jaargemiddelde temperaturen vertonen een vergelijkbare interjaarlijkse variabiliteit tussen de stations en een opwarmende trend over de waarnemingsperiode (figuur 5, hoofdstuk 4.3). Grotere verschillen zijn te zien voor de stations Keulen, Amerongen en Brienenoordbrug, waarvan sommige een hogere variabiliteit laten zien met sterkere positieve anomalieën ten opzichte van 2010 dan de andere stations.



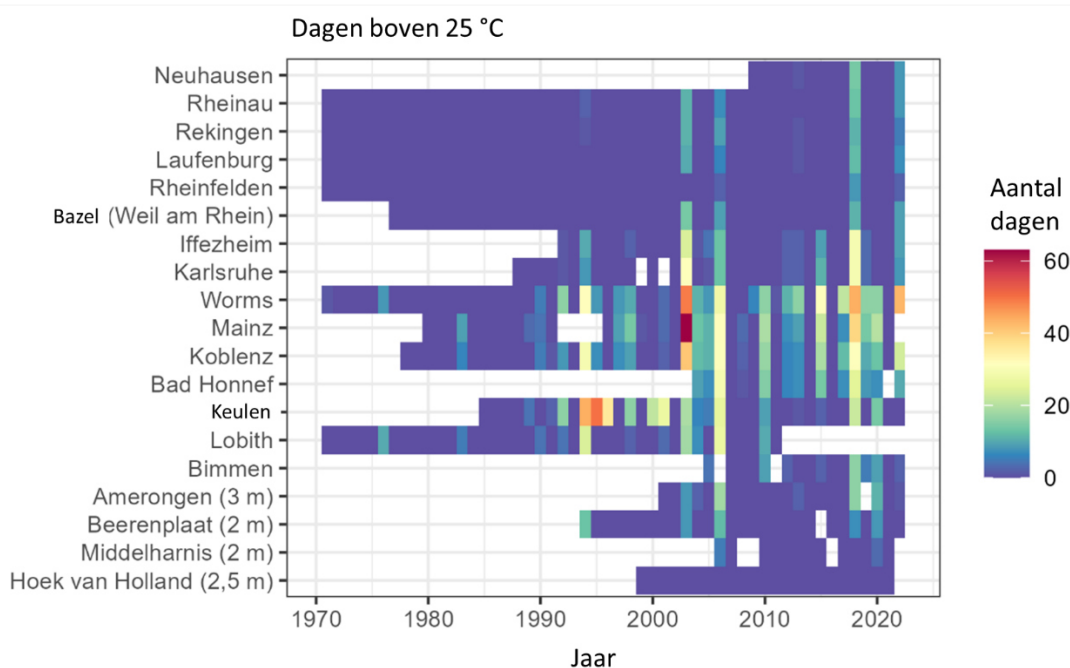
Figuur 5: "Climate stripes" voor de watertemperatuur op de meetstations aan de Rijn in de loop der jaren. Weergegeven is het verschil tussen de jaargemiddelde temperatuur en het referentiejaar 2010. Het jaar 2010 werd gekozen, omdat er voor dit jaar op alle stations metingen beschikbaar zijn.

4.2 Frequentieanalyse (extreme waarden)

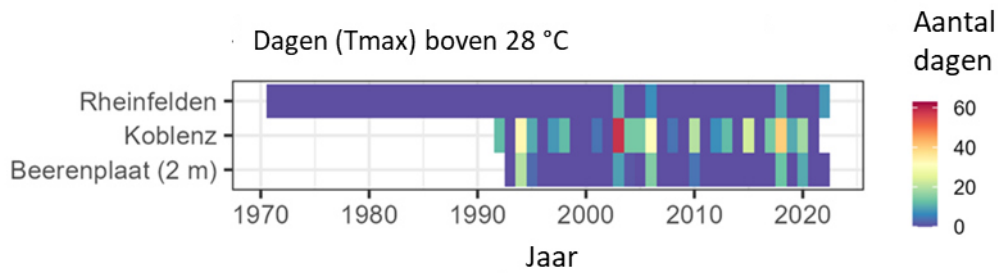
Voor warmtelozingen en voor ecologische kwesties is het aantal dagen boven specifieke drempelwaarden een relevante parameter. Voor de beoordeling van de verspreiding van exoten zijn temperaturen in de winter relevant; het voortplantingssucces kan bijvoorbeeld worden geschat aan de hand van de dagen $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Voor een frequentieanalyse worden de dagen per jaar waarop de daggemiddelde temperatuur hoger of lager is dan de respectieve drempelwaarde bij elkaar opgeteld. Voor dit rapport zijn de drempelwaarden $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figuur 6), $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figuur 8), $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figuur 9) en, vanwege de relevantie voor de biologie, $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figuur 10) en daarnaast $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tabel A.1) geselecteerd in overeenstemming met de Kaderrichtlijn Water en de verschillende nationale wet- en regelgeving.

Voor de noordelijke, Duits-Franse Bovenrijn en de Middenrijn is een opeenstapeling van dagen met overschrijdingen van $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ te zien (figuren 6-9). Opvallend zijn ook de bijzonder warme jaren (1994, 2003, 2006, 2018, 2020 en 2022), waarin bijna overal in de Rijn overschrijdingen van de daggemiddelde temperatuur van $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden waargenomen (figuur 6).

Voor de meeste stations waren voor dit rapport daggemiddelde waarden voor de watertemperatuur beschikbaar. Om de situatie in de zomer te beoordelen, wordt vaak de maximale dagtemperatuur gebruikt. Daarom werd ter vergelijking voor enkele stations het aantal dagen per jaar berekend waarop de maximale dagtemperatuur hoger is dan $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figuur 7). Het algemene patroon verandert niet in dit type analyse, hoewel het aantal overschrijdingsdagen toeneemt in warme jaren, zoals te verwachten is. Voor een overschrijding van de maximale dagtemperatuur is het voldoende dat de watertemperatuur gedurende één meetinterval hoger is dan $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, terwijl als er wordt gekeken naar het daggemiddelde de watertemperatuur over een gehele dag aanzienlijk warmer moet zijn.

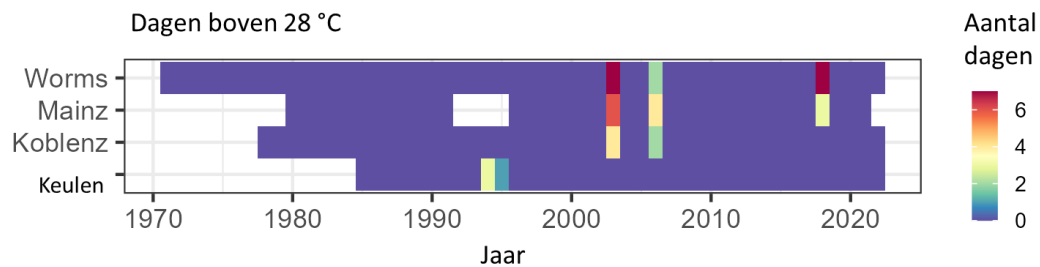


Figuur 6: Aantal dagen met een daggemiddelde temperatuur $> 25\text{ }^{\circ}\text{C}$



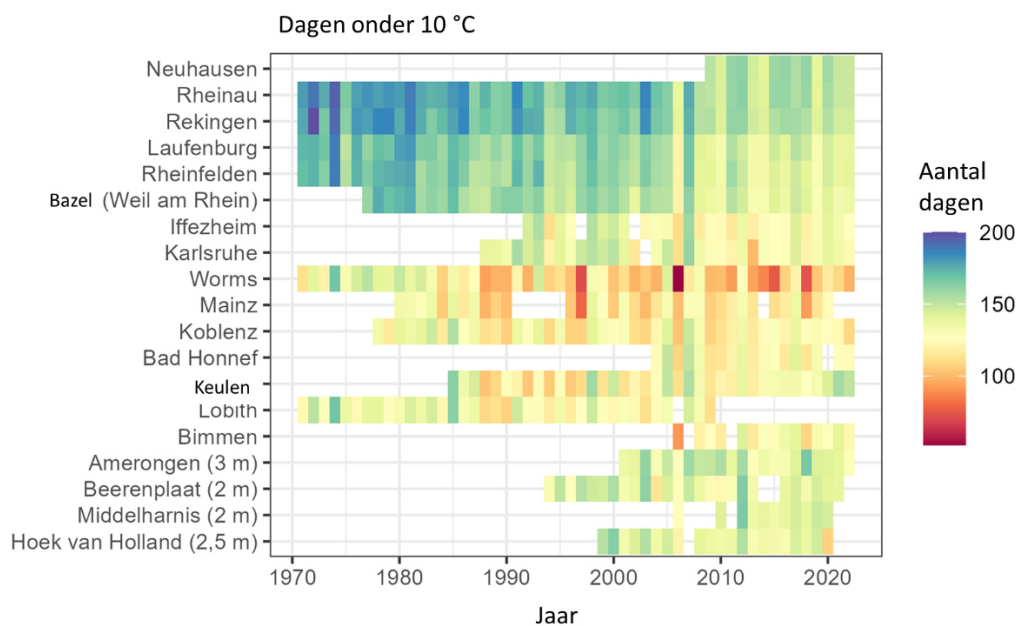
Figuur 7: Aantal dagen met een maximale dagwaarde voor de watertemperatuur > 25 °C

De drempelwaarde van 28 °C is tot nu toe slechts in enkele stations (van Worms tot Keulen) en in enkele jaren (1994, 1995, 2003, 2006 en 2018) overschreden. Hierbij moet worden benadrukt dat de evaluatie betrekking heeft op daggemiddelde temperaturen. Als op uurbasis zou worden gekeken, werd de drempelwaarde van 28 °C hoogstwaarschijnlijk in meerdere stations en in meerdere jaren overschreden (figuur 8).



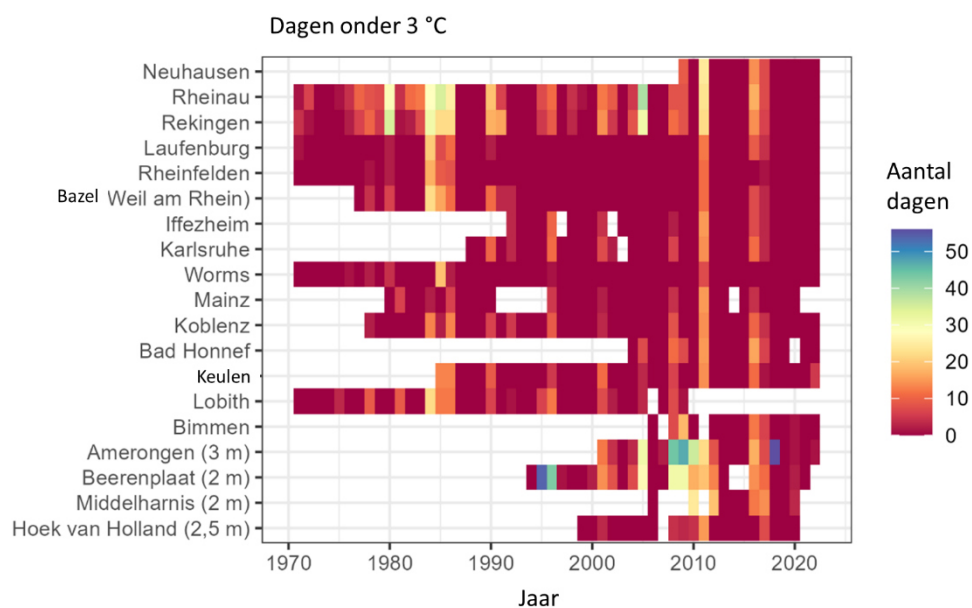
Figuur 8: Aantal dagen met een daggemiddelde temperatuur > 28 °C. Weergegeven zijn alleen de stations waar de drempelwaarde is overschreden. Op alle andere stations is de drempelwaarde niet overschreden.

Het patroon van de temperaturredalingen onder de drempelwaarde van 10 °C is vergelijkbaar met dat van de overschrijdingen van 25 °C, met een frequentere onderschrijding in de noordelijke, Duits-Franse Bovenrijn en de Middenrijn. In de Hoogrijn en de zuidelijke Duits-Franse Bovenrijn is er de afgelopen 15 jaar echter een duidelijke trend waarneembaar naar een minder frequente onderschrijding van de drempelwaarde. De winter 2006/2007 valt als bijzonder warm op (figuur 9).



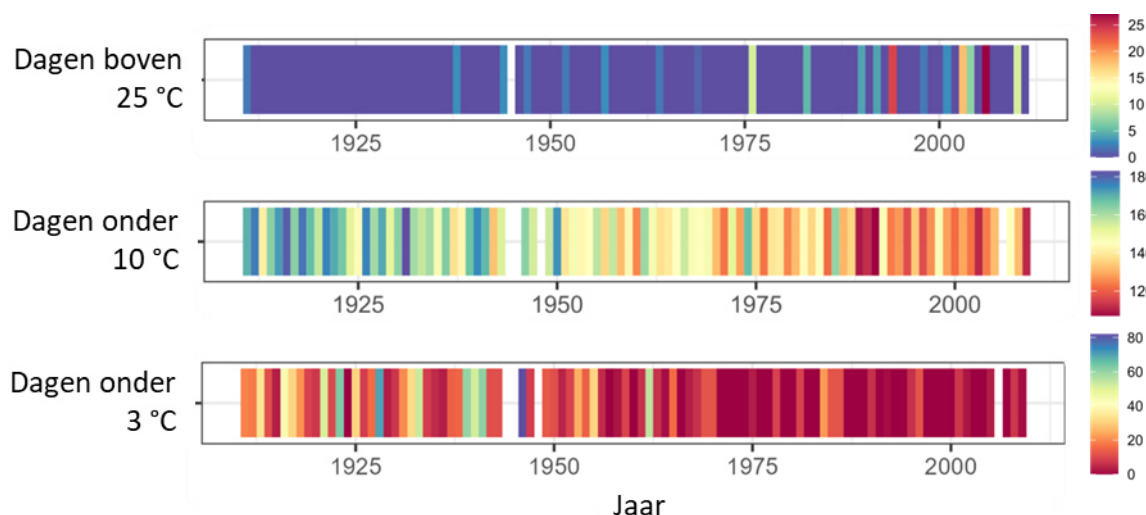
Figuur 9: Aantal dagen in het winterhalfjaar (november-april) met een daggemiddelde temperatuur < 10 °C. Het jaartal staat telkens voor het voorgaande jaar, bijvoorbeeld staat 2000 voor de winter van 2000/2001. Jaren waarin meer dan een kwart van de daggemiddelde waarden van het winterhalfjaar ontbreken, zijn niet in aanmerking genomen.

Er is een dalende trend voor dagen met watertemperaturen onder 3 °C (figuur 10). In het verleden (1984/1985-1986/1987) werden dagen onder 3 °C soms in de hele Rijn waargenomen (geen metingen voor de Rijndelta in deze meetperiode). Na 1990 (dan wel na 1995 en na 2005) werden er meestal alleen nog in de Hoogrijn en de Rijndelta meer dan 20 van dergelijke dagen geteld. Afzonderlijke koude jaren kwamen nog steeds voor in de hele Rijn (2011/2012 en 2016/2017). Er waren ook herhaalde warme winters waarin er geen daggemiddelde temperaturen onder 3 °C werden waargenomen (1987/1988-1989/1990, 1994/1995, 2003/2004, 2006/2007, 2013/2014-2015/2016, 2019/2020 en 2021/2022).



Figuur 10: Aantal dagen in het winterhalfjaar (november-april) met een daggemiddelde temperatuur < 3 °C. Het jaartal staat telkens voor het voorgaande jaar, bijvoorbeeld staat 2000 voor de winter van 2000/2001.

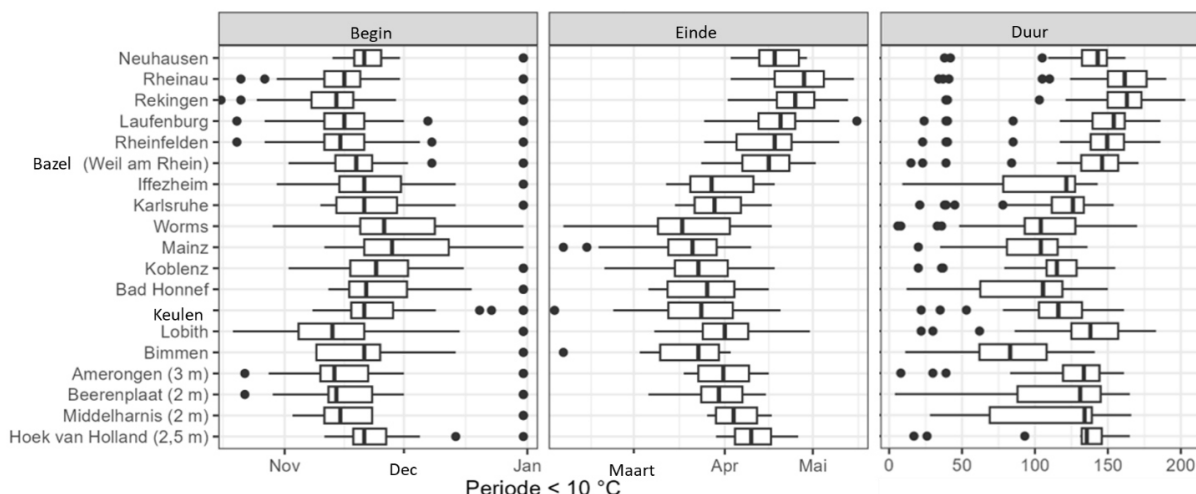
Het station Lobith speelt een bijzondere rol. Dankzij de lange meetreeks van daggemiddelden kunnen de overschrijdingen van de drempelwaarden over 99 jaar worden berekend (figuur 11). Aan het begin van de 20^e eeuw werd 25 °C bijna nooit overschreden op het station Lobith. Vooral in de laatste 20 jaar van de geanalyseerde tijdreeks is er een duidelijke toename van het aantal overschrijdingsdagen. In de hete zomer van 2006 werd de drempelwaarde van 25 °C alles samen genomen bijna een maand lang overschreden. Een nog duidelijker patroon is te herkennen voor de dagen onder 10 °C en onder 3 °C. Ook hier is er een duidelijke opwarmingstrend met een afname van het aantal dagen onder de respectieve drempelwaarde.



Figuur 11: Aantal over- en onderschrijdingsdagen in het station Lobith. Aantal dagen met een daggemiddelde temperatuur > 25 °C (boven). Aantal dagen in het winterhalfjaar (november-april) met een daggemiddelde temperatuur < 10 °C (midden). Aantal dagen in het winterhalfjaar (november-april) met een daggemiddelde temperatuur < 3 °C (onder). Het jaartal van de winterparameters staat telkens voor het voorgaande jaar, bijvoorbeeld staat 2000 voor de winter van 2000/2001. Jaren waarin meer dan een kwart van de daggemiddelde waarden van het winterhalfjaar ontbreken, zijn niet in aanmerking genomen.

In de meeste gevallen komt de duur van de 25 °C-overschrijdingen overeen met het aantal overschrijdingsdagen. Slechts in relatief weinig jaren en in een klein aantal stations leiden korte temperatuurdalingen tot meerdere kortere gebeurtenissen met een overschrijding van de drempelwaarde.

De aaneengesloten periode met watertemperaturen onder 10 °C varieert langs de Rijn (figuur 12). In de Duits-Franse Bovenrijn en de Rijndelta begint de koude fase iets eerder dan in de Middenrijn en de Duitse Nederrijn. Dit patroon is duidelijker voor de berekende einddatum van de koude fase. Deze komt het laatst in de Hoogrijn en het vroegst in de Middenrijn en de Duitse Nederrijn. Dit resulteert in hetzelfde patroon in de duur van de koude fase. De fase duurt het langst in de Hoogrijn en het kortst in de Middenrijn. Dit zou de invloed van warmtelozingen kunnen weerspiegelen.



Figuur 12: Begin, einde en duur van de koude periode (< 10 °C) in de winter voor de jaren 2009–2021. De linker- en de rechterkant van de box zijn respectievelijk het 25- en het 75-percentiel, de zwarte lijn in de box is de mediaan, de stippen zijn uitschieters.

4.3 Trendanalyse

De gemiddelde luchttemperatuur in het Rijnstroomgebied vertoont in de beschouwde periode een stijgende trend (figuur 13). De figuren 14 tot en met 19 laten het relatieve verloop van de watertemperatuur op de meetpunten langs de Rijn zien. Het relatieve verloop beschrijft het verschil tussen de gemeten temperatuur en het gemiddelde van de referentieperiode van de WMO⁴ (1991–2020).

De temperatuurcurven verlopen per meetstation anders (tabel 5). In principe is de luchttemperatuur een proxy voor de interactie van rivierwater met de atmosfeer en de straling (hoofdstuk 2.1). Antropogene warmtelozingen betreffen vaak afvalwarmte van de industrie en elektriciteitscentrales.

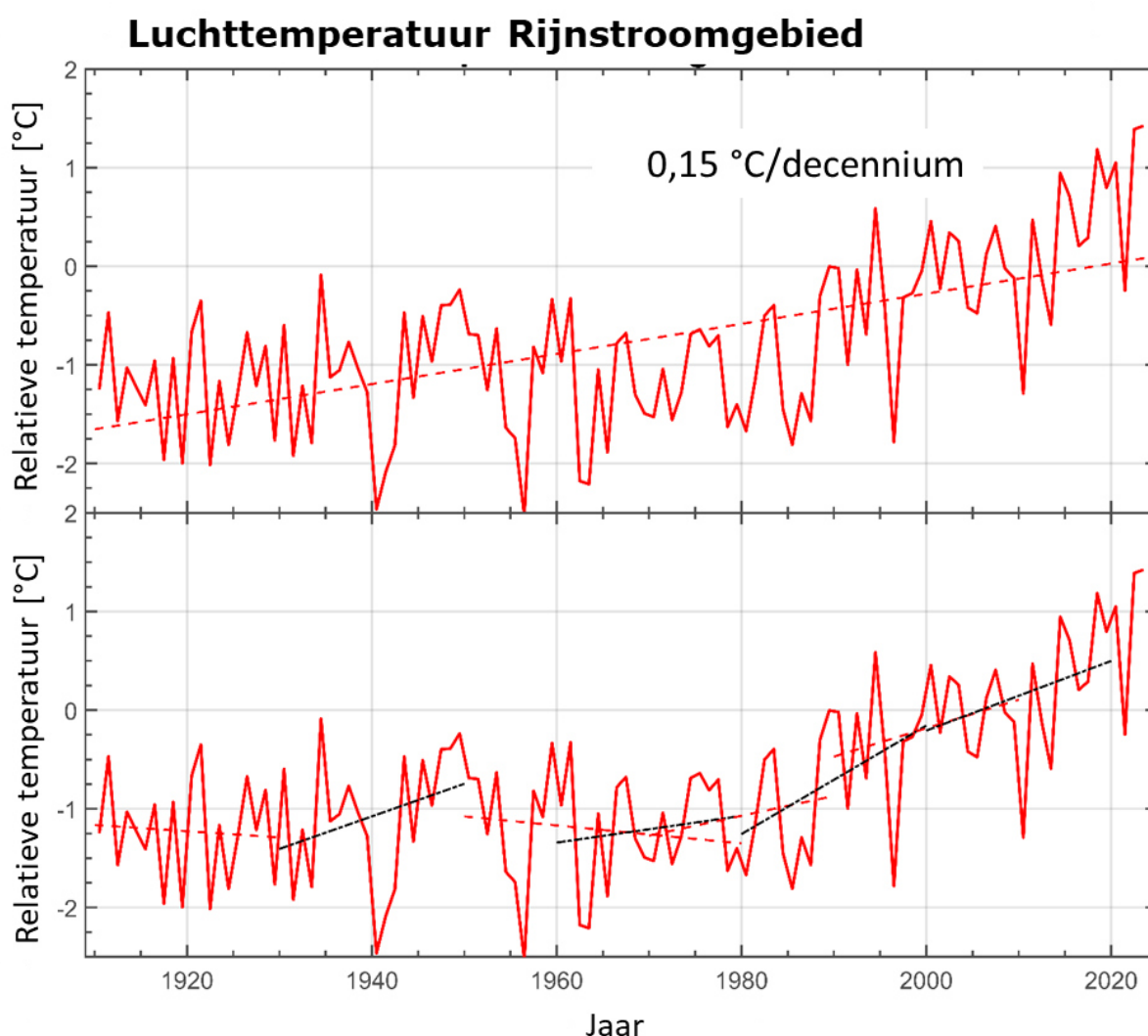
Tabel 5: Trends in de ontwikkeling van de watertemperatuur (WT) op lange termijn in °C per decennium. Voor de evaluatie zijn stations aan de Rijn met zo lang mogelijke tijdreeksen geselecteerd die de verschillende Rijntrajecten weergeven.

		WT Rekingen	WT Bazel	WT Worms	WT Koblenz	WT Keulen	WT Bimmen/ Lobith	Lucht- temperatuur
Periode		1969– 2023	1977– 2023	1970– 2023	1978– 2023	1986– 2023	1911– 2023	1910–2023
Totale periode	min.	0,20	0,36	0,45	0,10	0,09	0,28	0,15
	gem.	0,44	0,50	0,54	0,29	-0,11	0,28	
	max.	0,58	0,66	0,69	0,61	-0,37	0,30	
1910–1930								-0,06
1920–1940							0,64	0,04
1930–1950							0,19	0,33
1940–1960							0,50	0,21
1950–1970							0,33	-0,14

⁴ Wereld Meteorologische Organisatie

1960–1980						0,47	0,14
1970–1990	0,35					0,26	0,20
1980–2000	0,65	0,60	1,15	0,63		0,37	0,55
1990–2010	0,24	0,43	0,16	0,02	-0,41	0,06	0,29
2000–2020	0,40	0,32	0,53	0,12	-0,24	0,17	0,35

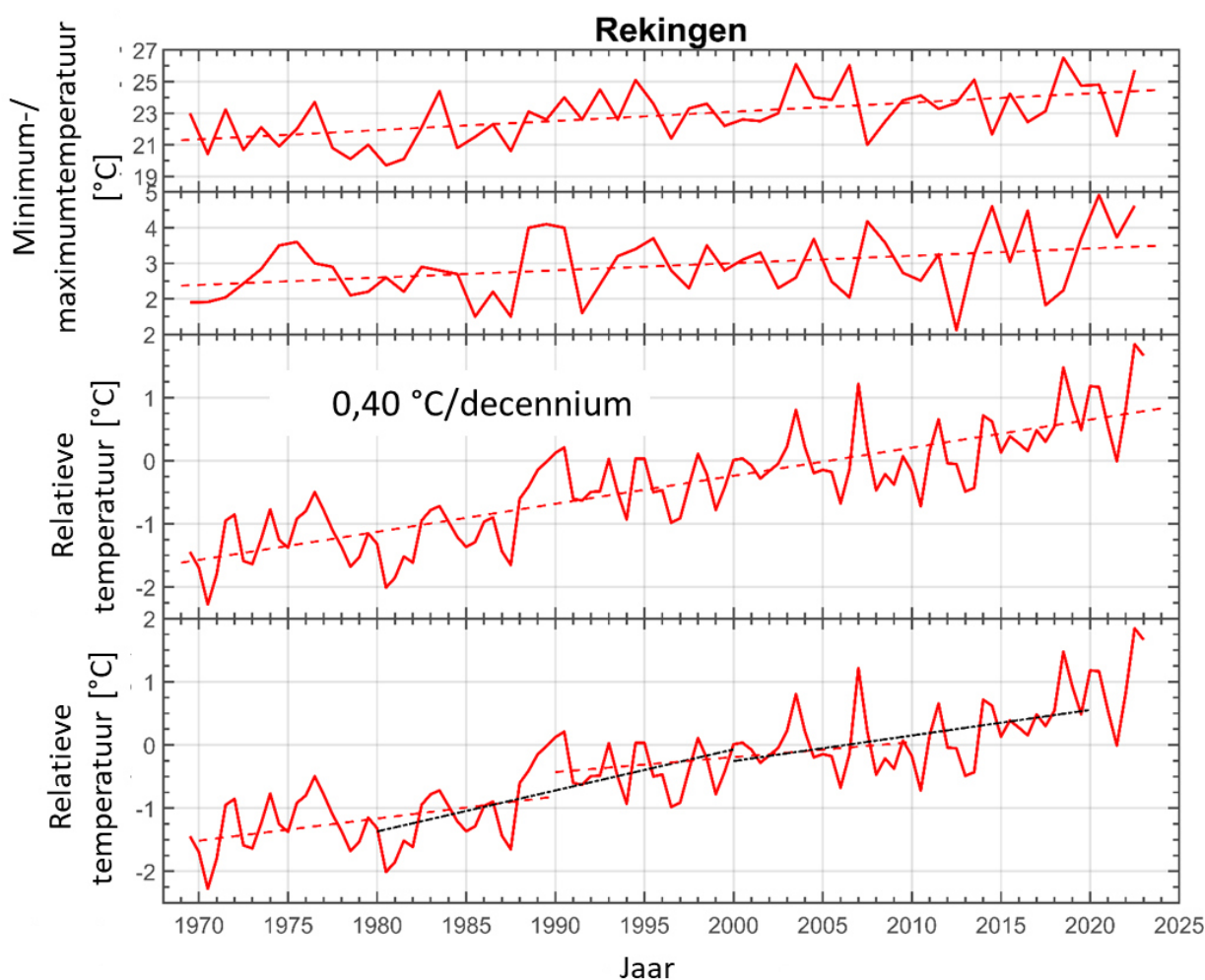
De luchttemperatuur in het stroomgebied van de Rijn vertoont over de gehele bekeken periode een stijgende trend van 0,15 °C/decennium (figuur 13 bovenaan). Kijkend naar de perioden van 20 jaar (figuur 13 onderaan), zijn de trends behoorlijk variabel. Over de periode 1910–2023 zijn er bijvoorbeeld zowel fasen van afkoeling als fasen van zwakke tot sterke opwarming. De verandering in de luchttemperatuur is een goede vergelijkingsparameter voor de verandering in watertemperatuur, omdat luchttemperatuur een centrale factor is in de warmtehuishouding van wateren en een duidelijk klimaatsignaal heeft en daardoor de klimatologische invloeden op de watertemperatuur beschrijft.



Figuur 13: Bovenaan: ontwikkeling van de jaargemiddelde luchttemperatuur in het Rijnstroomgebied sinds 1990. De gemiddelde temperatuur over 1990–2020 werd afgetrokken van de absolute temperatuur. De stippellijn toont de lineaire fit over de gehele dataset, waarbij de helling van de fit wordt aangegeven in °C per decennium.

Onderaan: de stippellijnen tonen de lineaire verandering in de tijdspanne in kwestie. De berekende hellingen van de fits zijn weergegeven in tabel 5.

Figuur 14 toont het verloop van de watertemperatuur in Rekingen; Rekingen ligt op Rijnkilometer 90,7 bovenstrooms de grote industriële centra aan de Rijn (Bazel, Mannheim, Ludwigshafen, Frankfurt) en benedenstrooms van het Bodensee. De trend voor de periode 1970-2020 is $0,40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennium}$. In dezelfde periode is de lucht met $0,34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennium}$ opgewarmd. Vergelijken met de andere meetstations verder Rijnafwaarts wordt de Rijn hier niet sterk beïnvloed. Toch is er een verschil in stijging tussen de lucht- en de watertemperatuur. Het verschil kan worden verklaard doordat de gemiddelde luchttemperatuur over het hele Rijnstroomgebied is genomen. Dit is mogelijk niet representatief voor de Duits-Franse Bovenrijn/de Alpenrijn/het Bodensee. Bovendien kunnen er ook hier al warmtelozingen de watertemperatuur verhogen.



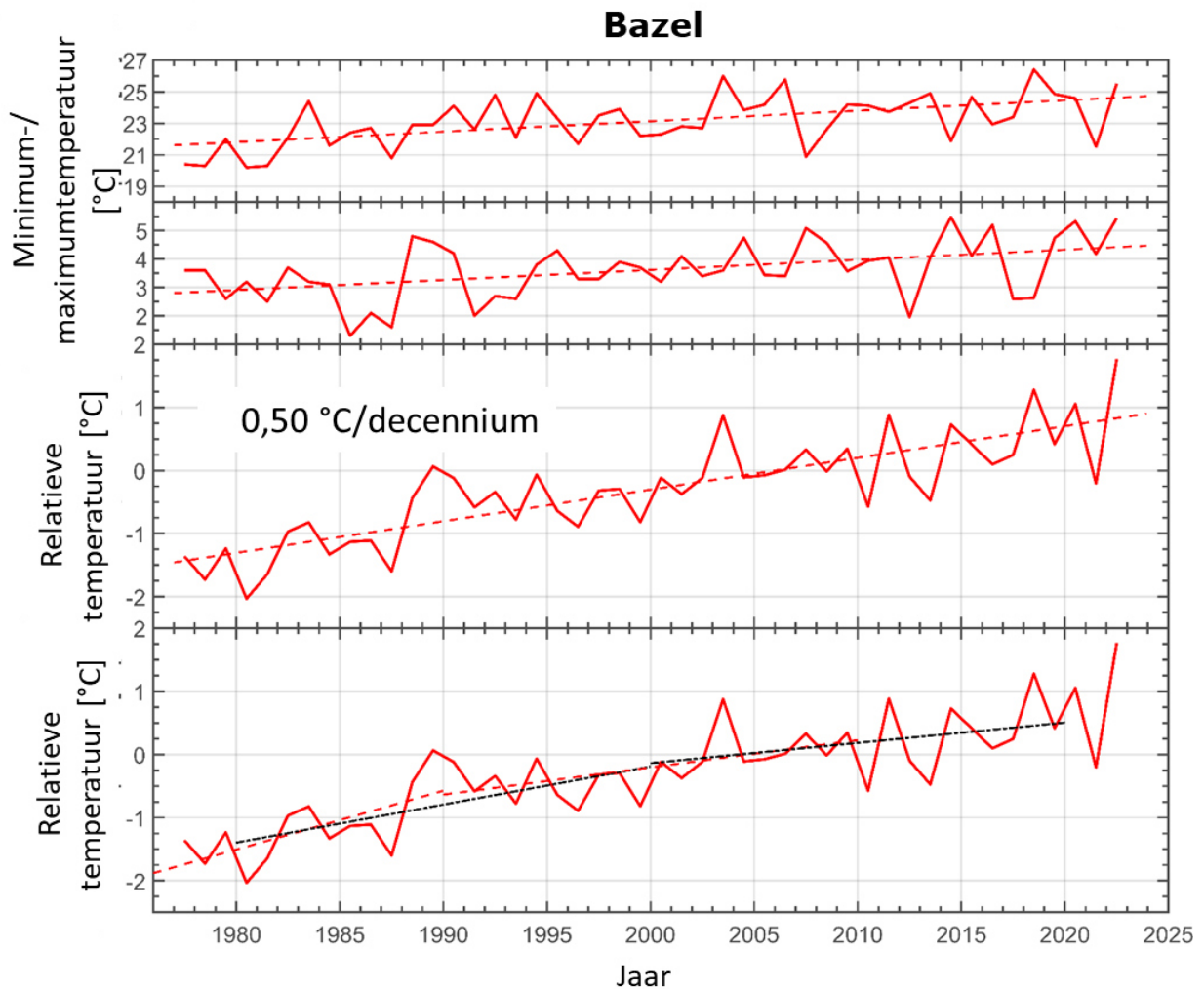
Figuur 14: Watertemperatuurgegevens van het station Rekingen, Rijnkilometer 90,7

Bovenaan: verloop van de jaarlijkse maximale en minimale dagtemperatuur.

Midden: ontwikkeling van de relatieve jaargemiddelde temperatuur. De gemiddelde temperatuur over 1990–2020 werd afgetrokken van de absolute temperatuur. De stippellijn toont de lineaire fit over de gehele dataset. Aangegeven is de helling van de fit per decennium.

Onderaan: de stippellijnen tonen de lineaire verandering in de tijdspanne in kwestie. De berekende hellingen van de fits zijn weergegeven in tabel 5.

Figuur 15 toont het verloop van de watertemperatuur bij Bazel. De trend toont hier een stijging van $0,50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennium}$ sinds 1978, wat hoger is dan de gemiddelde stijging van de luchttemperatuur. Dit is waarschijnlijk het gevolg van het toenemende aantal warmtelozingen door industrie en steden.



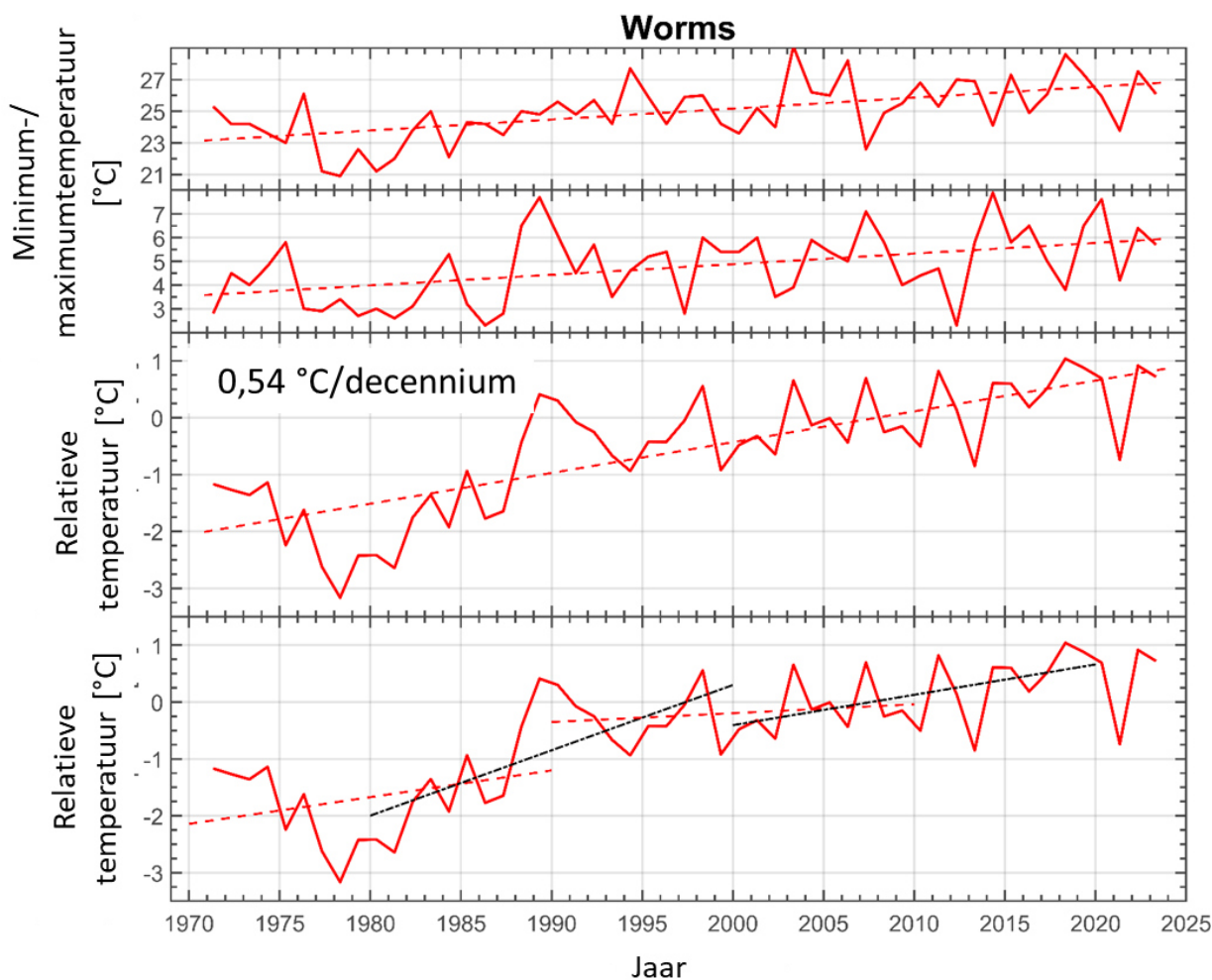
Figuur 15: Watertemperatuurgegevens van het station Bazel, Rijnkilometer 174

Bovenaan: verloop van de jaarlijkse maximale en minimale dagtemperatuur.

Midden: ontwikkeling van de relatieve jaargemiddelde temperatuur. De gemiddelde temperatuur over 1990–2020 werd afgetrokken van de absolute temperatuur. De stippellijn toont de lineaire fit over de gehele dataset. Aangegeven is de helling van de fit per decennium.

Onderaan: de stippellijnen tonen de lineaire verandering in de tijdspanne in kwestie. De berekende hellingen van de fits zijn weergegeven in tabel 5.

Figuur 16 toont het verloop van de watertemperatuur bij Worms. Het is interessant om te zien dat de temperatuur vooral tussen het begin van de jaren 1970 en het einde van de jaren 1980 sterk is gestegen. Dit kan enerzijds worden verklaard door een verandering in de klimatologische omstandigheden (HARI et al. 2006) en anderzijds door de toegenomen warmtelozingen van kerncentrales, die in deze periode in bedrijf werden genomen op de Rijn (figuur 22).



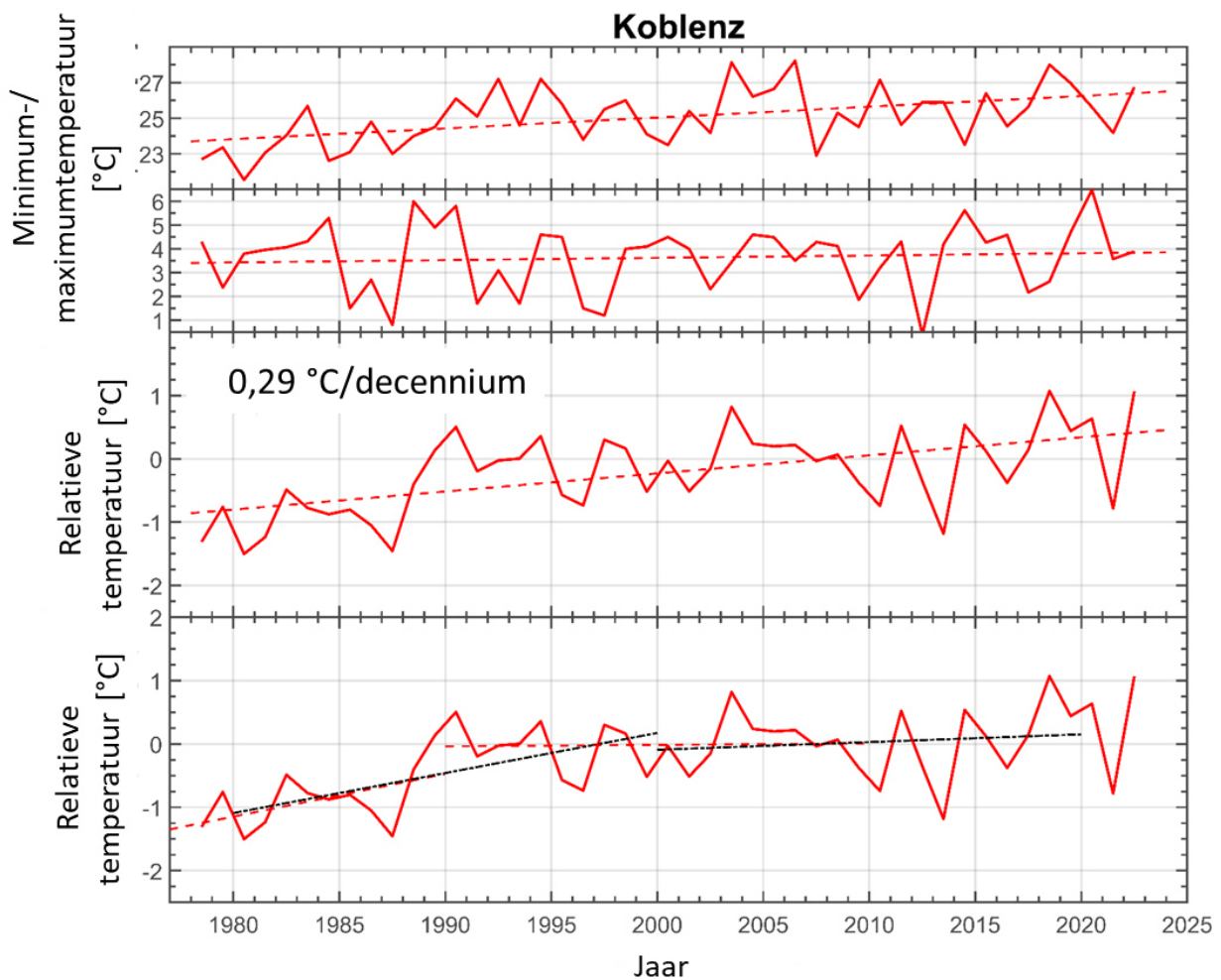
Figuur 16: Watertemperatuurgegevens van het station Worms, Rijnkilometer 443,3

Bovenaan: verloop van de jaarlijkse maximale en minimale dagtemperatuur.

Midden: ontwikkeling van de relatieve jaargemiddelde temperatuur. De gemiddelde temperatuur over 1990–2020 werd afgetrokken van de absolute temperatuur. De stippellijn toont de lineaire fit over de gehele dataset. Aangegeven is de helling van de fit per decennium.

Onderaan: de stippellijnen tonen de lineaire verandering in de tijdspanne in kwestie. De berekende hellingen van de fits zijn weergegeven in tabel 5.

Het verloop voor Koblenz (figuur 17) is vergelijkbaar met dat voor Worms (figuur 16), hoewel ook hier vermoedelijk als gevolg van een combinatie van warmtelozingen en klimaatverandering vooral tussen 1980 en 1990 een sterkere trendstijging zichtbaar is.



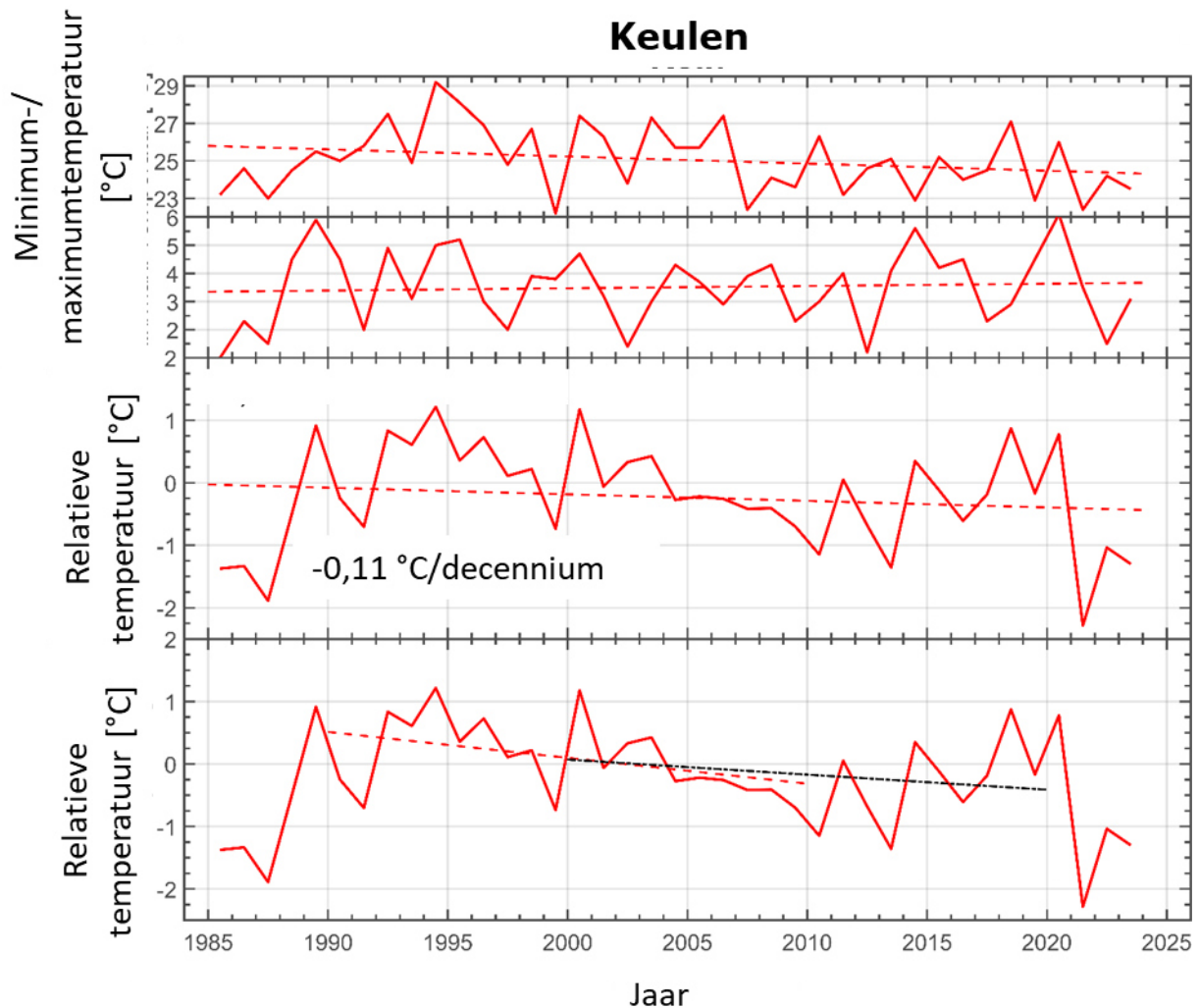
Figuur 17: Watertemperatuurgegevens van het station Koblenz, Rijnkilometer 590,3

Bovenaan: verloop van de jaarlijkse maximale en minimale dagtemperatuur.

Midden: ontwikkeling van de relatieve jaargemiddelde temperatuur. De gemiddelde temperatuur over 1990–2020 werd afgetrokken van de absolute temperatuur. De stippellijn toont de lineaire fit over de gehele dataset. Aangegeven is de helling van de fit per decennium.

Onderaan: de stippellijnen tonen de lineaire verandering in de tijdspanne in kwestie. De berekende hellingen van de fits zijn weergegeven in tabel 5.

De metingen in Keulen (figuur 18) moeten apart worden bekeken. Hier is de enige negatieve trend in de meetreeksen aan de Rijn zichtbaar. Dit zou kunnen worden verklaard door de korte tijdreeks, aangezien er geen gegevens beschikbaar zijn van vóór 1985 en er dus alleen gegevens zijn van na de sprong in de luchttemperatuur en het in gebruik nemen van de kerncentrales. Deze gegevensreeks omvat de periode vanaf de piek van de kernenergieproductie tot het stilleggen van de kerncentrales. Ook wordt er vermoed dat er lokale effecten zijn. Er zouden bijvoorbeeld veranderingen kunnen zijn geweest in het industriecentrum Wesseling, die worden weerspiegeld in de warmtehuishouding aan het meetstation in Keulen.



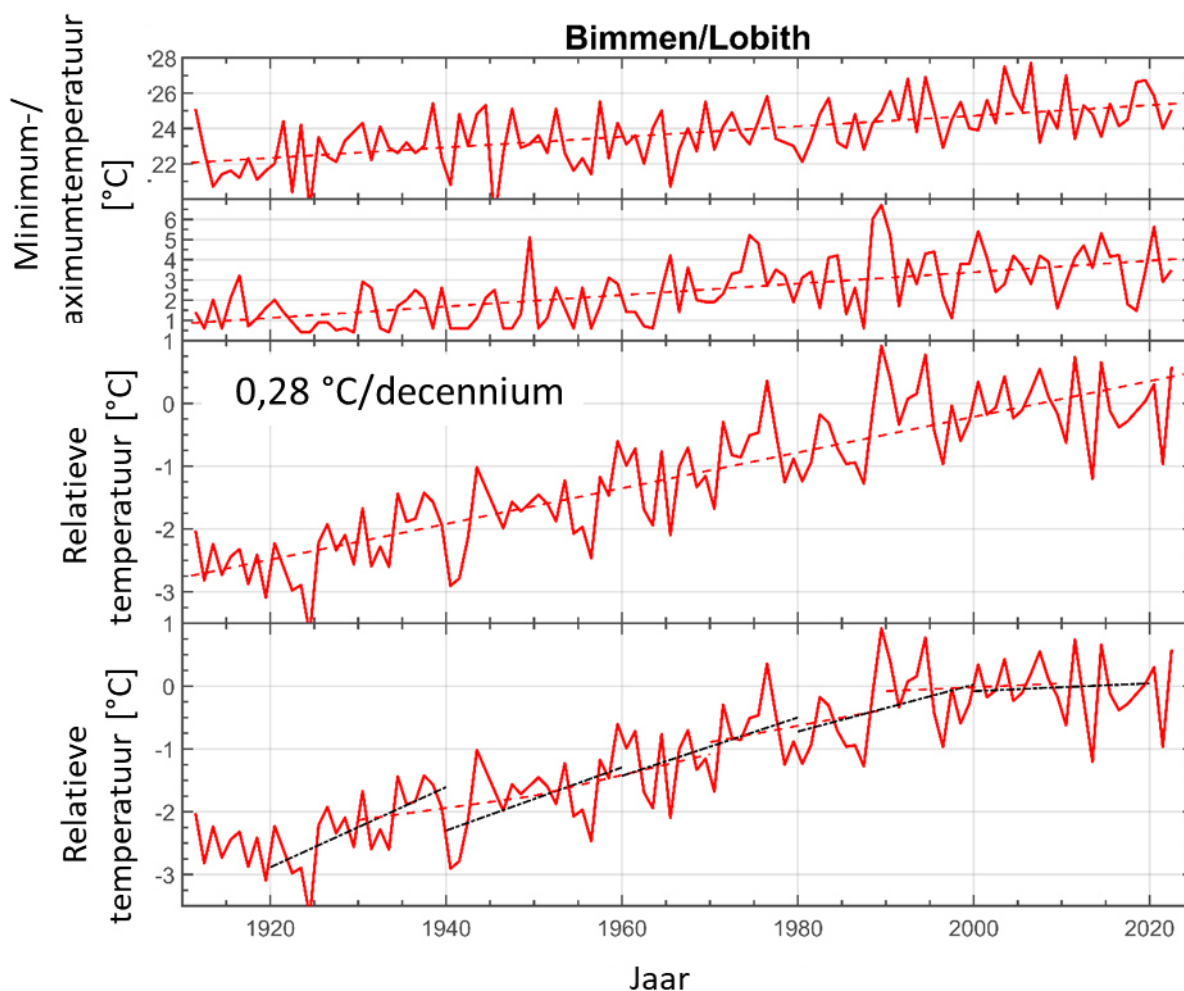
Figuur 18: Watertemperatuurgegevens van het station Keulen, Rijnkilometer 688

Bovenaan: verloop van de jaarlijkse maximale en minimale dagtemperatuur.

Midden: ontwikkeling van de relatieve jaargemiddelde temperatuur. De gemiddelde temperatuur over 1990–2020 werd afgetrokken van de absolute temperatuur. De stippellijn toont de lineaire fit over de gehele dataset. Aangegeven is de helling van de fit per decennium.

Onderaan: de stippellijnen tonen de lineaire verandering in de tijdspanne in kwestie. De berekende hellingen van de fits zijn weergegeven in tabel 5.

De ontwikkeling van de langste beschikbare tijdreeks van de watertemperatuur in de Rijn voor het gecombineerde station Bimmen/Lobith is zeer interessant (figuur 19, hoofdstuk 2.2). Over de gehele periode steeg de watertemperatuur met $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennium}$ en de luchttemperatuur met $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{decennium}$. Het verschil kan waarschijnlijk worden verklaard door industriële warmtelozingen en ook hier zou nog moeten worden nagegaan in hoeverre de luchttemperatuur in het Rijnstroomgebied als geheel representatief is voor de luchttemperatuur bij Lobith. Sinds 1990 heeft de watertemperatuur op dit meetpunt een plateau bereikt, hoewel de luchttemperatuur in deze periode is blijven stijgen. Dit zou het gevolg kunnen zijn van de stillegging van centrales, energie-efficiëntiemaatregelen bij warmte-emittenten en lagere productie op industriële locaties langs de Rijn.



Figuur 19: Watertemperatuurgegevens van het station Bimmen/Lobith, Rijnkilometer 862,3

Bovenaan: verloop van de jaarlijkse maximale en minimale dagtemperatuur.

Midden: ontwikkeling van de relatieve jaargemiddelde temperatuur. De gemiddelde temperatuur over 1990–2020 werd afgetrokken van de absolute temperatuur. De stippellijn toont de lineaire fit over de gehele dataset. Aangegeven is de helling van de fit per decennium.

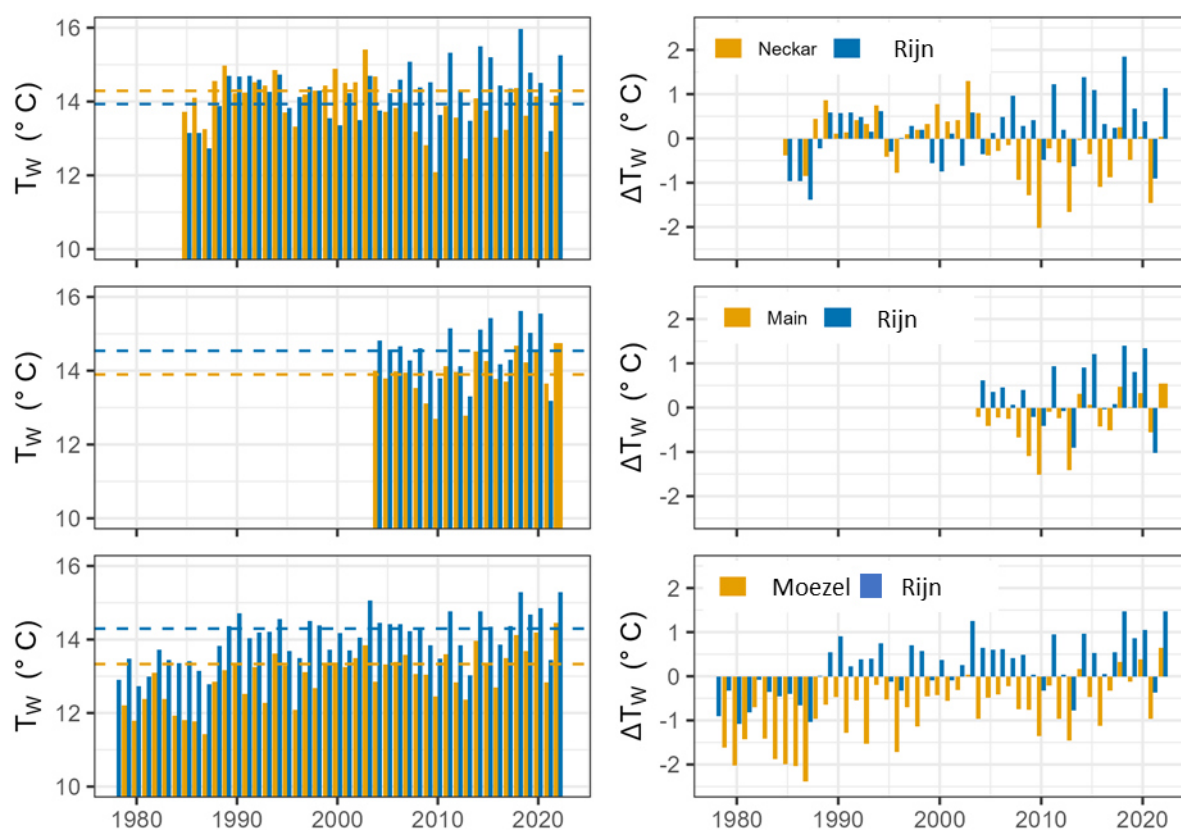
Onderaan: de stippellijnen tonen de lineaire verandering in de tijdspanne in kwestie. De berekende hellingen van de fits zijn weergegeven in tabel 5.

4.4 Invloed van grote zijrivieren op de watertemperatuur van de Rijn

Het gemiddelde temperatuurverschil tussen de jaargemiddelde temperaturen van **de Rijn en de Neckar** voor de periode 2004–2022 is ongeveer 1,1 °C (figuur 20 bovenaan), het kleinste temperatuurverschil is 0,4 °C in 2020 en het grootste is 1,7 °C in 2009. Over de gehele periode bedraagt het gemiddelde temperatuurverschil ongeveer 0,8 °C, het kleinste temperatuurverschil werd in 1998 gemeten op 0 °C, en het grootste temperatuurverschil blijft 1,7 °C in 2009.

Het gemiddelde temperatuurverschil tussen de jaargemiddelde temperaturen van **de Rijn en de Main** voor de periode 2004–2022 is ongeveer 0,7 °C (figuur 20 in het midden), het kleinste temperatuurverschil is 0,2 °C in 2012 en het grootste is 1,2 °C in 2015.

Het gemiddelde temperatuurverschil tussen de jaargemiddelde temperaturen van **de Rijn en de Moezel** voor de periode 2004–2022 is ongeveer 1,0 °C (figuur 20 onderaan), het kleinste temperatuurverschil is 0,6 °C in 2021 en het grootste is 1,6 °C in 2004. Over de gehele periode bedraagt het gemiddelde temperatuurverschil ongeveer 1 °C, het kleinste temperatuurverschil werd in 1999 gemeten met 0,4 °C, en het grootste temperatuurverschil in 1993 met 1,9 °C.



Figuur 20: Vergelijking tussen de watertemperatuur in de hoofdstroom van de Rijn en de zijrivieren (Neckar, Main, Moezel).

Links: jaargemiddelde watertemperatuur in de Rijn (blauw) en de zijrivieren (oranje). De stippellijnen tonen de gemiddelden over de periode 2004–2022 (voor deze periode zijn er voor alle drie de stations gegevens beschikbaar).

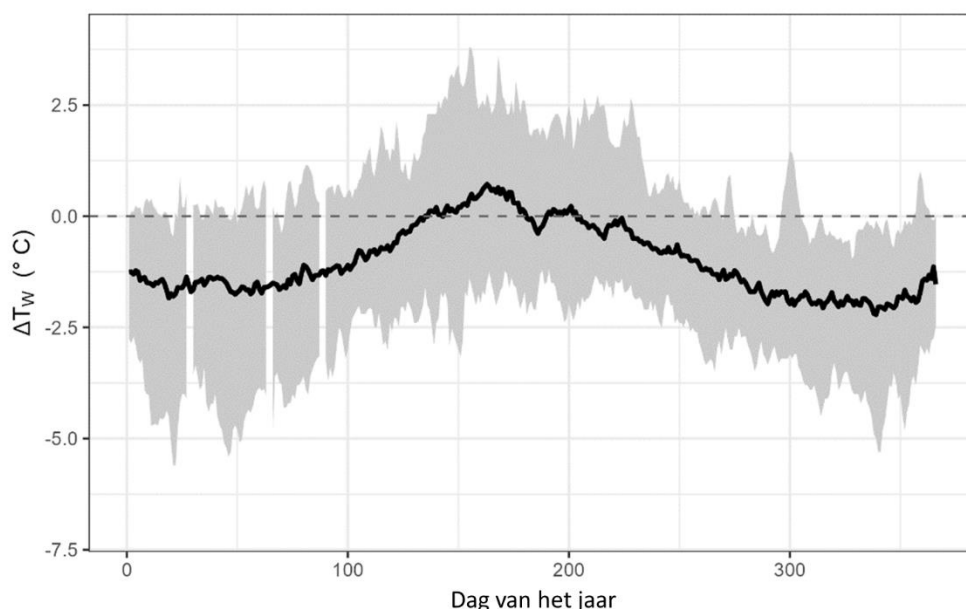
Rechts: verschil tussen de jaargemiddelde temperaturen en het gemiddelde van de twee rivieren voor de periode 2004–2022. De som van de staven per jaar levert het temperatuurverschil tussen de Rijn en de zijrivieren op.

Het verloop van de temperatuurverschillen tussen de zijrivieren en de Rijn verschilt aanzienlijk. Opvallend is dat de **Neckar** aan het begin van de tijdreeks, in de jaren 1980, en later rond 2000 meestal warmer was dan de Rijn. In de jaren 1990 hadden beide rivieren relatief vergelijkbare watertemperaturen. Sinds 2005 is het verschil omgekeerd en is de Rijn in de meeste jaren warmer dan de Neckar. Zoals reeds beschreven in [ICBR-rapport 209](#), houdt dit verband met de stillegging van de kerncentrale Obrigheim. Tegen het einde van de tijdreeks is de Neckar koeler dan het langjarige gemiddelde van de jaargemiddelden van beide rivieren.

Vergeleken met het langjarige gemiddelde van de jaargemiddelden van beide rivieren (2004–2022) was de **Moezel** aan het begin van de tijdreeks relatief koel (figuur 20, onderaan). Door de opwarming van de Moezel zijn de jaargemiddelden dichterbij het langjarige gemiddelde komen te liggen; de laatste jaren waren ze vaak hoger. De warmere Rijn ligt duidelijk vroeger, sinds 1989, meestal boven het langjarige gemiddelde. Alleen in afzonderlijke koude jaren is het temperatuurverschil negatief.

Het dagelijkse temperatuurverschil tussen de Rijn en de Moezel schommelt gedurende het jaar (figuur 21). In het winterhalfjaar is de Moezel koeler dan de Rijn, maar aan het begin van de zomer, rond juni, iets warmer. De verklaring kan zeker worden gevonden in de verschillende watervolumes van de rivieren. De Moezel kan sneller opwarmen door het kleinere volume en de tragere stroomsnelheid, terwijl de Rijn langzamer reageert en de temperatuur langer vasthoudt. In de winter is het effect van antropogene warmtelozingen in de Rijn mogelijk groter dan in de Moezel, waardoor het temperatuurverschil tussen de twee rivieren toeneemt.

Over het geheel genomen is te zien dat de invloed van de zijrivieren verschillend is. In het verleden hadden de rivieren zowel een opwarmend effect (Neckar tot ongeveer de millenniumwisseling) als een afkoelend effect (Moezel en Neckar in de laatste twee decennia). Bovendien schommelt het temperatuurverschil tussen de zijrivieren en de Rijn in de loop van het jaar (figuur 21), zodat de zijrivieren afhankelijk van het seizoen een opwarmend of afkoelend effect kunnen hebben. Alles samen genomen hebben de zijrivieren nog steeds een enigszins afkoelend effect op de Rijn ([ICBR-rapport 209](#)).



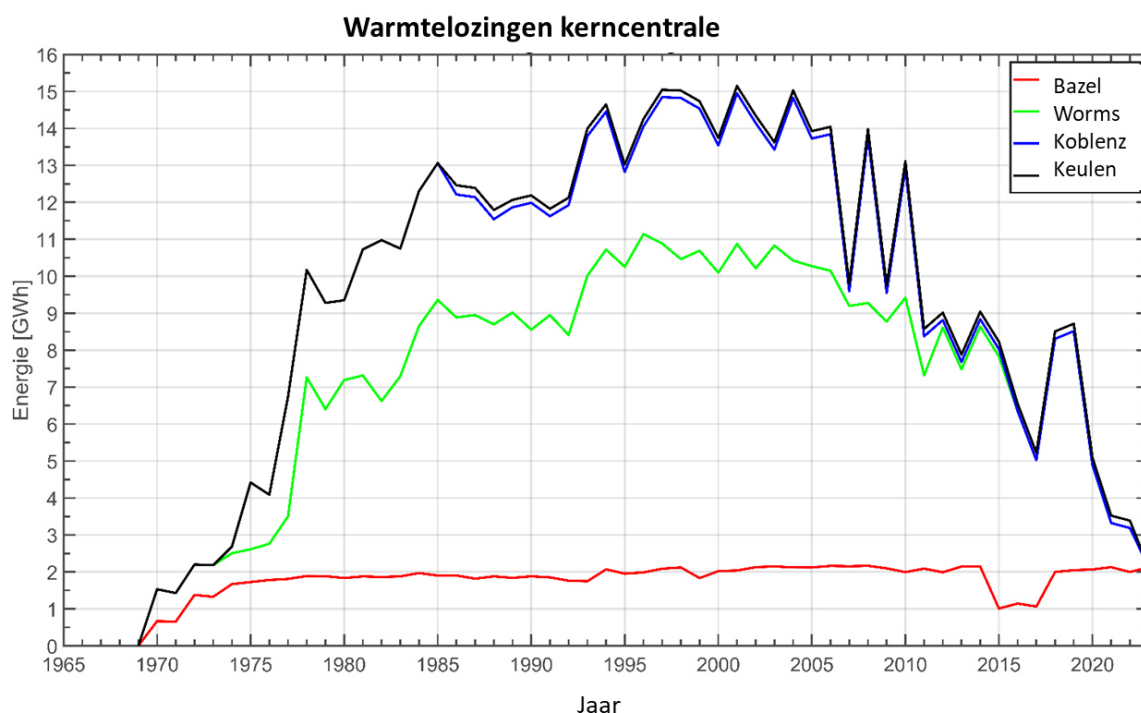
Figuur 21: Fluctuatie in het temperatuurverschil tussen de watertemperatuur van de Moezel en de Rijn per dag van het jaar in de loop van het jaar (grijs) en gemiddelde per dag van het jaar, telkens voor de bekeken jaren 1978–2022

4.5 Invloed van grote warmte-emittenten op de watertemperatuur van de Rijn

De randvoorwaarden voor het temperatuurbeheer van de Europese wateren zijn vastgelegd in de Kaderrichtlijn Water. Hiervan afgeleide drempelwaarden voor de watertemperatuur in verband met warmtelozingen worden op nationaal niveau geregeld. In Duitsland bijvoorbeeld bepaalt de Oppervlaktewaterverordening (OGewV) de maximumtemperatuur waaraan warmtelozingen moeten voldoen, afhankelijk van het type waterlichaam en vooral de visgemeenschap.

Aan de Rijn gebruiken vooral industriebedrijven en elektriciteitscentrales Rijnwater om hun processen te koelen. De wetgeving van de Rijnsoeverstaten biedt de mogelijkheid om regulerend op te treden. Zo kan het gebruik van Rijnwater voor koeling op middellange en lange termijn worden beïnvloed via de verlening van vergunningen voor warmtelozingen. Bij gebeurtenissen met extreme luchttemperaturen (hittegolven) en de daarmee gepaard gaande hoge watertemperatuur rest de wetgever als enige mogelijkheid om door middel van voorschriften samen met de industrie de warmtelozingen te beperken. Dit dient ter bescherming van de fauna en flora tegen hittestress en leidt meestal tot een teruggang in de productie of de toepassing van alternatieve koelmaatregelen in de bedrijven.

De meest uitgebreide studie naar warmtelozingen in de Rijn is gepubliceerd door BUND (2009). Daarnaast hebben ZAVARSKY & DÜSTER (2020) een schatting gegeven van de verandering in de warmtelozingen van kerncentrales op basis van productiegegevens.



Figuur 22: Warmtelozingen van kerncentrales bovenstrooms van meetstations. De energie beschrijft de toevoer van warmtelast in GWh per jaar.

In figuur 22 worden de warmtelozingen van de kerncentrales bovenstrooms van de meetstations beschreven. De maximale warmtelozingen werden tussen 1995–2005 bereikt. De Zwitserse kerncentrales leveren sinds de jaren 1970 een constante bijdrage aan het warmtebudget. Sinds de kernramp in Fukushima in 2011 en de Duitse beslissing om kernenergie uit te faseren, is de warmtelozing van de Duitse kerncentrales voortdurend gedaald. Na de sluiting van de Franse kerncentrale Fessenheim in juni 2020

blijven de Zwitserse kerncentrales en de Franse kerncentrale Cattenom aan de Moezel als enige over in het Rijnstroomgebied.

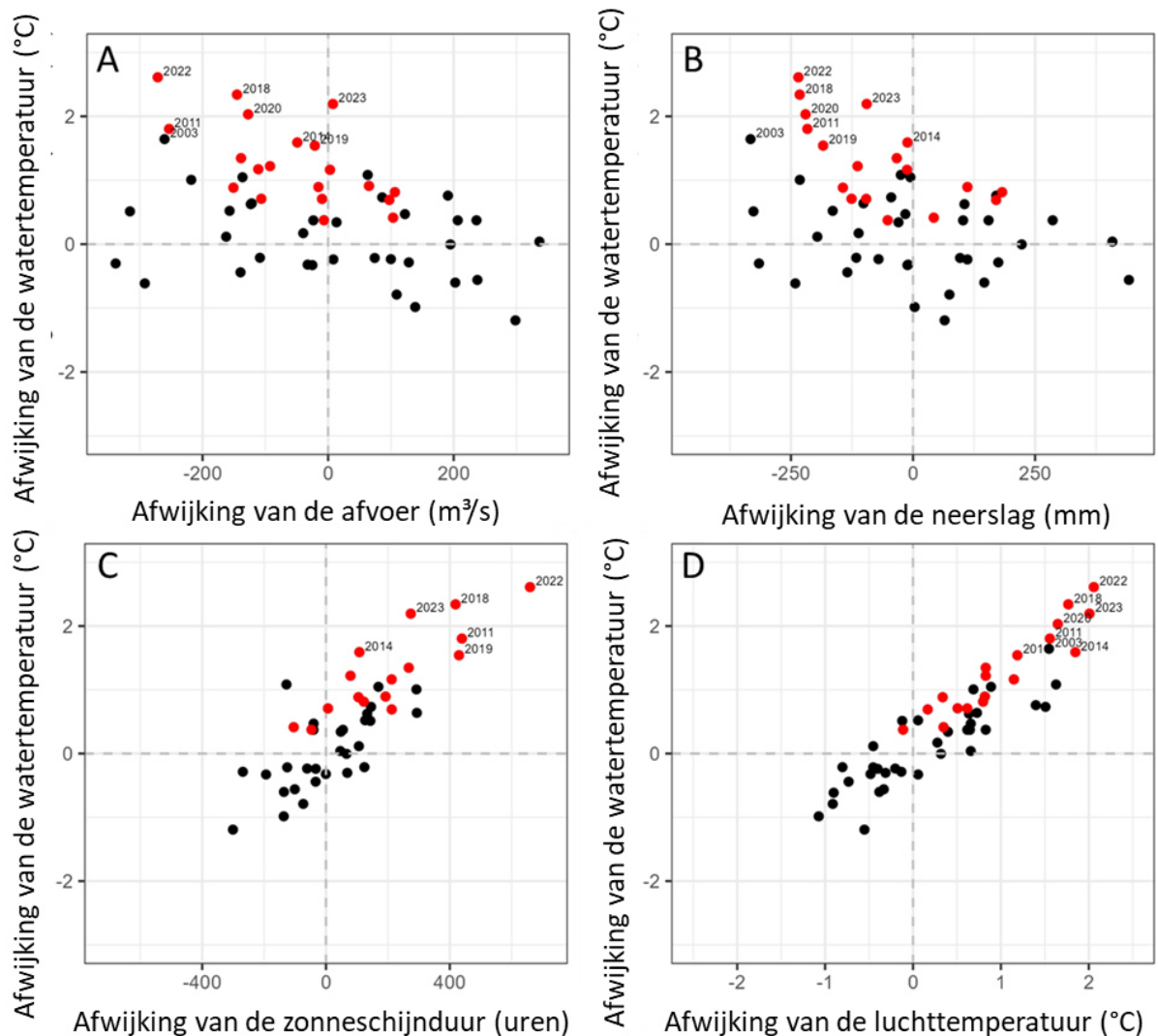
Door de sluiting van de Duitse kerncentrales en de omschakeling in de elektriciteitsproductie en de industrie zijn de hoeveelheden warmte die de afgelopen jaren op de Rijn zijn geloosd vermoedelijk aanzienlijk veranderd, zodat kan worden aangenomen dat de warmtebelasting de voorbije jaren is afgenomen.⁵ Wegens de veranderingen in de warmtelozingen zou er moeten worden gestreefd naar een nieuwe analyse op de schaal van de BUND-studie (2009). Daarbij moet worden bedacht dat het meestal alleen mogelijk is om te verwijzen naar de maximaal vergunde lozingshoeveelheden, terwijl de daadwerkelijk geloosde hoeveelheden warmte meestal kleiner zijn. Vanuit het oogpunt van de natuurlijke warmtehuishouding moet de toegenomen opwekking van zonne- en windenergie positief worden beoordeeld, omdat hiervoor geen koelwater nodig is. In het algemeen is de verwachting dat de sluiting van kerncentrales en de verhoogde energie-efficiëntie van de industrie, in combinatie met hogere energiekosten, de hoeveelheid op de Rijn geloosde warmte heeft doen afnemen.

5. Invloed van laagwater op de watertemperatuur

Het afgelopen decennium werd de Rijn gekenmerkt door meerdere langere laagwaterfases (BfG 2021). Afzonderlijke laagwaterjaren zijn in verschillende rapporten onderzocht (BfG 2021; [ICBR-rapport 263](#); SCHWANDT et al. 2019) en hoeven hier niet gedetailleerd te worden behandeld. In dit hoofdstuk worden de gegevens van het station Rheinfelden als voorbeeld getoond vanwege de zeer goede gegevenssituatie en de ligging van het station aan het begin van het bekeken Rijngebied.

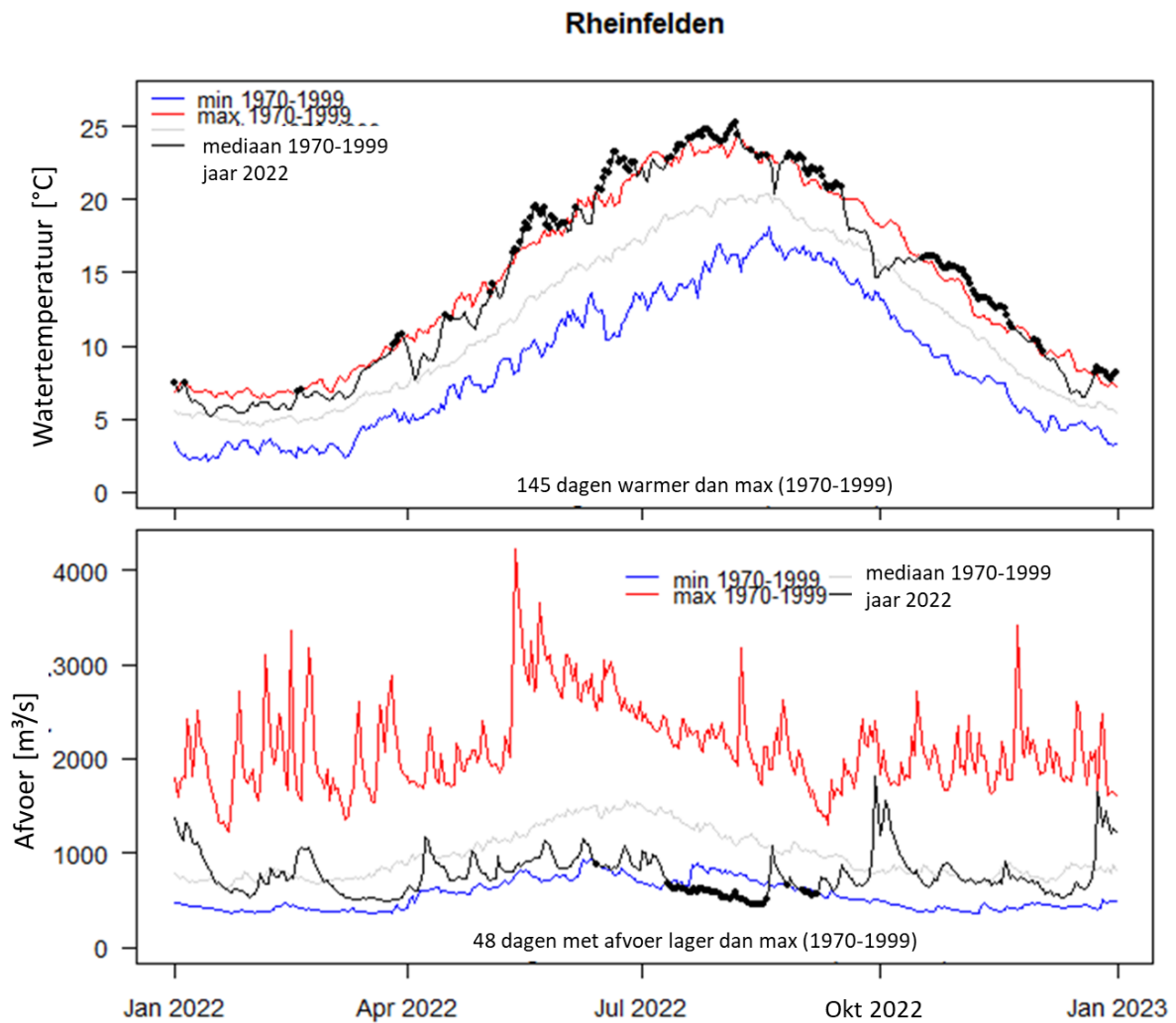
Als de afwijkingen van de jaargemiddelde watertemperaturen ten opzichte van het langjarige gemiddelde worden vergeleken met verschillende hydrologische en meteorologische factoren worden er duidelijke verbanden zichtbaar voor afvoer, zonneshijnduur en luchttemperatuur (figuur 23). Het verband met neerslag is minder uitgesproken. Het duidelijkste verband is gevonden tussen luchttemperatuur en watertemperatuur en tussen zonneshijnduur en watertemperatuur. Bijzonder warme jaren in termen van luchttemperatuur en bijzonder zonnige jaren zijn ook bijzonder warme jaren in termen van watertemperatuur. Dit is niet verwonderlijk, aangezien beide factoren belangrijke variabelen zijn in de warmtehuishouding van rivieren (hoofdstuk 1.1). Warmere jaren vallen vaak ook samen met jaren met lagere afvoeren (figuur 23, A) en vertonen vaak een verband met laagwaterjaren.

⁵ De EG STEMP heeft voor intern gebruikt een inventaris opgemaakt van de warmtelozingen in de periode 2010-2020 (vergunde en daadwerkelijke waarden, > 200 MW).



Figuur 23: Afwijking van de jaargemiddelde afvoer (A), de jaarlijkse neerslagsom (B), de jaarlijkse som van de zonneshijnduur (C), de jaargemiddelde luchttemperatuur (D) en de watertemperatuur ten opzichte van het langjarige gemiddelde (1970–1999) voor het station Rheinfelden (CH). Rood weergegeven zijn de voorbije 20 jaar, d.w.z. 2004–2023.

In het warmste jaar, 2022, was het op 145 dagen warmer dan het langjarige gemiddelde van de referentieperiode 1970–1999 (figuur 24 bovenaan). De afvoer lag in dit jaar lange tijd onder de mediaan van de referentieperiode. Op 48 dagen was de afvoer lager dan minimumafvoer die is waargenomen in de referentieperiode (figuur 24 onderaan). Tijdens de twee uitgesproken warme periodes (relatief voor de tijd van het jaar) in het late voorjaar en de vroege zomer was de afvoer al laag, maar binnen het bereik van de metingen van de periode 1970–1999. In de late zomer viel de uitzonderlijk lage afvoer samen met de hoge watertemperatuur. In de late herfst en de winter lagen de watertemperaturen weer boven het langjarige maximum en was de afvoer gemiddeld.



Figuur 24: Ontwikkeling van de watertemperatuur (bovenaam) en de afvoer (onderaan) in de loop van het jaar voor een zeer warm jaar (2022) in het station Rheinfelden

Het wordt duidelijk dat de belangrijkste factoren die de watertemperatuur beïnvloeden de componenten van de warmtehuishouding zijn die in hoofdstuk 1.1 worden beschreven. Laagwater kan een warme periode in het water verergeren, omdat het watervolume dat wordt opgewarmd kleiner is (BFG 2021, SCHWANDT et al. 2019). De projectie voor de toekomst is dat de afvoer in de Rijn in de winter zal toenemen, maar in de zomer zal afnemen ([ICBR-rapport 297](#)). De opwarming van de watertemperaturen als gevolg van de voortschrijdende klimaatverandering kan dus worden versterkt door een afname van de afvoer in de zomer.

6. Conclusies

De gegevensbasis van gemeten watertemperaturen voor dit rapport is aanzienlijk uitgebreid door de opname van aanvullende stations in Zwitserland en Nederland, en omvat nu de hele Rijn benedenstreams van het Bodensee.

Er is nog steeds langs de hele Rijn een toename waar te nemen in het aantal dagen waarop kritische temperaturedrempels worden overschreden; in de Middenrijn is het aantal overschrijdingsdagen het grootst.

Het aantal koude dagen in de winter neemt af. De verandering is bijzonder duidelijk in de Hoogrijn en de Duits-Franse Bovenrijn.

Bepaalde bijzonder warme gebeurtenissen springen er nog steeds uit in de ontwikkeling op lange termijn. De zomers van 2003 en 2006 hebben sinds het vorige ICBR-rapport over de ontwikkeling van de watertemperaturen gezelschap gekregen van meerdere warme jaren (2018, 2020, 2022).

De luchttemperatuur is een centrale factor in de warmtehuishouding van wateren, en de opwarming van de luchttemperatuur is daarom een goede vergelijkingsparameter voor de verandering van de watertemperatuur.

Alle op trends onderzochte stations laten een progressieve opwarming van de watertemperatuur zien, met uitzondering van Keulen, waar sprake is van een negatieve trend. De verklaring ligt in lokale meeteffecten aan het station van Keulen, die een afname van de industriële lozingen in de buurt van het meetstation weerspiegelen. De grootste opwarmingstrends zijn te zien in de Hoogrijn, de Duits-Franse Bovenrijn en de Middenrijn.

De grote zijrivieren Neckar, Main en Moezel hebben gemiddeld allemaal een veeleer afkoelend effect op de watertemperatuur van de Rijn.

De sluiting van de Duitse kerncentrales en de verhoogde energie-efficiëntie van de industrie heeft de hoeveelheid op de Rijn geloosde warmte doen afnemen.

De laagwatergebeurtenissen in het recente verleden hebben bijgedragen aan de toegenomen opwarming van de watertemperaturen in de Rijn.

7. Vooruitblik⁶

Door de toepassing van geautomatiseerde sensoren op veel stations is de meetfrequentie verhoogd, zodat de informatie gebruikt zou kunnen worden voor verdere evaluaties, bijvoorbeeld om verschillen tussen dag- en nachttemperaturen te analyseren. Voor een vervolgrapport wordt in dit verband ook aanbevolen om een analyse uit te voeren van de dagen waarop de maximale dagwaarde van de watertemperatuur werd overschreden. Deze kunnen worden berekend op basis van een tijdreeks met een hogere meetfrequentie dan daggegevens.

Lange tijdreeksen zijn bijzonder waardevol, omdat ze analyses in klimatologische zin mogelijk maken (gemiddelden over 30 jaar) en de gegevenssituatie voor toekomstige studies nog kan worden verbeterd. Het is belangrijk om de werkzaamheden in de bestaande stations voort te zetten; hier wordt verwezen naar de lengte van de tijdreeksen voor de waterhoeveelheid en de luchttemperatuur.

Aanbevolen wordt om een gedetailleerdere data- en literatuurstudie uit te voeren waarin de verschillende watertemperatuuranalyses, waarvan sommige zeer ver terug in de tijd liggen, worden samengevat en zo mogelijk metingen uit het verdere verleden worden

⁶ De in de "Vooruitblik" genoemde aanbevelingen zullen in maart 2025 worden besproken tijdens de ICBR-workshop "Klimaatverandering en de gevolgen daarvan in het Rijnstroomgebied".

verzameld om de gegevensreeksen nog langer te maken en nog beter onderbouwde uitspraken te kunnen doen over de trendontwikkeling.

Industriële warmtelozingen en lozingen van energiecentrales zijn steeds verder afgenomen.⁷ Het wordt duidelijk dat het thermische gebruik van de rivier sterk zal veranderen. In de toekomst zou de toepassing van rivierwarmtepompen relevant kunnen worden; het effect hiervan zou in een volgende update van het rapport kunnen worden onderzocht.

Ook wordt aanbevolen om uitgebreid onderzoek te doen naar warmtelozingen, vergelijkbaar met wat door BUND 2009 is gedaan, aangezien er veel veranderd is en blijft veranderen met betrekking tot warmtelozingen.

Aanvullende informatie is te vinden in [ICBR-rapport 297](#), waarin de veranderingen in het afvoerregime van de Rijn worden beschreven, en in het rapport "Simulation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development" (publicatie als ICBR-rapport 302 gepland in de lente/zomer van 2025), waarin de toekomstige ontwikkeling van de watertemperaturen van de Rijn wordt toegelicht.

Dankwoord

Dank voor de uitgebreide levering van watertemperatuurmetingen. Een speciaal woord van dank gaat uit naar de collega's die jarenlang gegevens hebben verzameld en nog steeds verzamelen. Lange gegevensreeksen zijn van onschatbare waarde voor de analyse van de langetermijnontwikkeling van de temperatuur in de Rijn en zijn stroomgebied; zonder deze gegevens zouden we blind zijn voor de veranderingen die zich in de rivier voltrekken.

⁷ De EG STEMP heeft voor intern gebruikt een inventaris opgemaakt van de warmtelozingen in de periode 2010-2020 (vergunde en daadwerkelijke waarden, > 200 MW).

Bibliografie

- BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ (BUND) (2009): Wärmelast Rhein.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (BFG) (2021): Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland. Analyse, Einordnung und Auswirkungen. Mitteilungen Nr. 35. Koblenz.
- CAISSIE, D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*. 51(8). 1389-1406.
- FORSTNER, A. E. (1894): Die Temperatur fließender Gewässer Mitteleuropas. – Geographische Abhandlungen, Band V, Heft 4, p. 1-95. Universität Wien.
- HARDENBICKER P., VIERGUTZ, C., BECKER, A., KIRCHESCH, V., NILSON, E. & H. FISCHER (2017): Water temperature increases in the river Rhine in response to climate change. *Regional Environmental Change*, 17, 299-308.
- HARI, R. E., LIVINGSTONE, D. M., SIBER, R., BURKHARDT-HOLM, P. & H. GÜTTINGER (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* 12(1). 10-26.
- ICBR (2013): ICBR-rapport 204: Actuele stand van de kennis over mogelijke effecten van veranderingen in het afvoerregime en de watertemperatuur op het ecosysteem van de Rijn en mogelijke handelingsperspectieven.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/NL/rp_NI_0204.pdf.
- ICBR (2013): ICBR-rapport 209: Presentatie van de ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater op basis van gevalideerde temperatuurmetingen in de periode 1978-2011.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/NL/rp_NI_0209.pdf.
- ICBR (2014): ICBR-rapport 214: Estimation of the effects of climate change scenarios on future Rhine water temperature development – extensive version.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/EN/rp_En_0214.pdf.
- ICBR (2020): ICBR-rapport 263: Rapport over de laagwatergebeurtenis van juli-november 2018.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/NL/rp_NI_0263.pdf.
- ICBR (2024): ICBR-rapport 297: Afvoerscenario's klimaatverandering voor het Rijnstroomgebied.
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/NL/rp_NI_0297.pdf.
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2013): Grundlagen für die Beurteilungen von Kühlwassereinleitungen in Gewässer.
- LIEFVELD, W. M. & R. POSTMA (2007): Two rivers: Rhine and Meuse. – Rijkswaterstaat Waterdienst. Lelystad, The Netherlands.
- MANNFELD, M. & H. FISCHER (2020): Wassertemperaturen, Sauerstoff & Chlorophyll-a: Rhein, Elbe. In: NILSON, E. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. 195 p.
- MUNLV (2009): Anpassung an den Klimawandel – Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
<http://www.umwelt.nrw.de/klima/klimawandel/anpassungspolitik/anpassungsstrategie/index.php>.

- SCHWANDT, D., HÜBNER, G., ZAVARSKY, A. & K. FRICKE (2019): Projektbericht. Wassertemperatur des Rheins bei Koblenz im Sommer 2018. HW 63. H.1.
- VINNÅ et al. (2023): Swiss-wide future river temperature under climate change "SwissFuRiTe". Basel. No. BGA-CH-78.
- WEBB, B. W. & Y. ZHANG (1997): Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological processes*. 11(1). 79-101.
- WETZEL, R. G. (2001): *Limnology: lake and river ecosystems*. Vol. 1. Academic Press.
- WUNDT, W. (1940): Beiträge zur Temperatur fließender Gewässer. *Peterm. Mitt.* Heft 12. 399-406.
- WUNDT, W. (1967): Der Temperaturgang an mitteleuropäischen Flüssen. *Peterm. Mitt.* Heft 2. 81-88.
- ZAVARSKY, A. & L. DÜSTER (2020): Anthropogenic influence on the Rhine water temperatures. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24(10). 5027-5041.

Bijlage: Overzicht van de over- en onderschrijdingsdagen

Tabel A.1: Overzicht van het aantal dagen waarop de drempelwaarden voor de watertemperatuur van 21,5 °C, 23 °C, 25 °C, 28 °C en 30 °C worden overschreden en van het aantal dagen waarop de drempelwaarden van 3 °C en 10 °C worden onderschreden

Een gedetailleerde beschrijving is te vinden in hoofdstuk 4.2.

Overzicht kan worden opgevraagd bij het ICBR-secretariaat.