



**Presentatie van de ontwikkeling van
de temperatuur
van het Rijnwater op basis van
gevalideerde temperatuurmetingen
in de periode 1978-2011**

Internationale
Kommission zum
Schutz des Rheins

Commission
Internationale
pour la Protection
du Rhin

Internationale
Commissie ter
Bescherming
van de Rijn

Rapport Nr. 209



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

ISBN 3-941994-36-0

© IKS-R-CIPR-ICBR 2013

Presentatie van de ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater op basis van gevalideerde temperatuurmetingen in de periode 1978-2011

Samenvatting

Uit het onderzoek naar de langjarige ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater blijkt tot dusver dat er een duidelijke correlatie bestaat tussen de watertemperatuur en de ontwikkeling van de luchttemperatuur in het Rijngebied. Ook bijzondere klimatologische gebeurtenissen, zoals in de winter van 1988/1989, de zomer van 2003 en 2006 en april 2007, worden significant weerspiegeld in de watertemperatuur.

De evaluatie van de tijdreeksen van 1978 tot 2011 toont voor deze periode een temperatuurstijging van 1,7 °C in Rekingen (Hoogrijn), 1,3 °C in Mainz (Duitse Bovenrijn) en 1,2 °C in Koblenz (Middenrijn). In de zomermaanden liggen de waarden zonder uitzondering duidelijk boven 2 °C. Deze trend ontwikkelt zich echter niet lineair over de gehele periode (1978-2011), maar resulteert hoofdzakelijk uit een stijging in de jaren 1987-1989.

Warmtelozingen dragen op regionale schaal bij tot een extra stijging van de watertemperatuur. Tot 2010 vond ongeveer 60% van de grote, vergunde warmtelozingen op de Rijn plaats op een kort stuk van de Duits-Franse Bovenrijn tussen Karlsruhe en Worms (ICBR-rapport 151). Mits alle emittenten hun vergunde capaciteiten tegelijkertijd volledig zouden benutten, kunnen deze lozingen, gerelateerd aan de gemiddelde afvoer bij Worms en na volledige menging, leiden tot een theoretische temperatuurstijging van maximaal 2,6 °C. De daadwerkelijk meetbare gemiddelde temperatuurstijging bedraagt bij Mainz echter circa 1,4 °C (gerelateerd aan de langjarig gemiddelde afvoer MQ) en neemt tot Koblenz verder af tot circa 1 °C. De temperatuurstijging tot Mainz kan in de eerste plaats worden toegeschreven aan de warmtelozingen in de regio Mannheim/Ludwigshafen-Worms en slechts in de tweede plaats aan de natuurlijke opwarming in de loop van de rivier.

De grote zijrivieren Neckar, Main en Moezel zorgen thans voor een geringe verlaging van de watertemperatuur in de Rijn. Deze verlaging ligt, over het gehele jaar op basis van gemiddelde afvoeren genomen, tussen 0,1 °C voor de Neckar en 0,2 °C voor de Moezel en wordt overwegend in de winter- en de herfstmaanden waargenomen. In de zomermaanden kan er geen temperatuurdaling als gevolg van de zijrivieren worden gemeten.

Uit de frequentieanalyse van de overschrijding van bepaalde thermische drempelwaarden, zoals bijv. 22 °C of 25 °C, blijkt dat het jaarlijkse aantal overschrijdingsdagen het afgelopen decennium duidelijk is gestegen ten opzichte van de twee voorgaande decennia. Omdat de snelheid van biochemische processen afhankelijk is van de temperatuur hebben aanhoudende extreme watertemperaturen een invloed op de vitale processen van alle waterorganismen.

De stillegging van vier productie-eenheden in kerncentrales aan de Duitse Bovenrijn in maart 2011 lijkt de warmtelozingen op de Rijn tussen Karlsruhe en Worms ongeveer gehalveerd te hebben. Op de meetlocatie Mainz is er in de tweede helft van 2011 een overeenkomstige halvering van de gemiddelde temperatuurstijging (ten opzichte van Karlsruhe) waargenomen.

1. Inleiding

In de jaren 2003 en 2006 zijn er in de Rijn nooit geziene maxima in de watertemperatuur gemeten met daggemiddelden tussen 28 °C en 29 °C in de Middenrijn en de Duitse Nederrijn. In het kader van de discussie over de klimaatverandering, die al eerder was losgebrand, hebben de voor de bescherming van de Rijn verantwoordelijke ministers de ICBR in oktober 2007 de opdracht gegeven om zich dieper te buigen over de effecten van de klimaatverandering op het stroomgebied van de Rijn. Daarop heeft de ICBR in 2009 een rapport gepubliceerd over de stand van de kennis tot dan toe (literatuurstudie) [ICBR 2009]. Verder is er in 2011 een Studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn verschenen [ICBR 2011]. In het eerste rapport wordt er ook gewezen op de gebrekkige kennis over de tot dusver doorlopen en de verwachte ontwikkeling van de watertemperatuur van de Rijn. Het voorliggende rapport vult deze lacune aan met een beschrijving van de langjarige ontwikkeling van de temperatuur van de Rijn.

Het onderhavige rapport is onder andere gebaseerd op de temperatuurgegevens die een ad-hocgroep in 2010 in opdracht van het Permanente Comité van de Duitse Commissie voor een Schone Rijn (nu: Stroomgebiedgemeenschap Rijn) heeft verzameld voor de totstandbrenging van een gemeenschappelijke en op plausibiliteit gecontroleerde databank van watertemperatuurgegevens voor de Rijn.

Het rapport opent met een samenvatting van het tot dusver uitgevoerde onderzoek naar de watertemperatuur in het Rijngebied. Vervolgens wordt er ingegaan op de gegevensbasis in het algemeen en de kwaliteit van de tijdreeksen van de temperatuur in het bijzonder. Daarna volgen een overzicht van de ontwikkeling van de temperatuur in de loop van de Rijn en statistische uitspraken, zoals een frequentieanalyse van extreme waarden en analyses van langjarige trends en seizoentrends. Tot slot wordt de invloed van zijrivieren en grote warmtelozers op de temperatuur van het Rijnwater weergegeven met speciale aandacht voor de recente ontwikkeling in 2011 na de stillegging van enkele productie-eenheden van kerncentrales in het Rijnstroomgebied.

In het onderhavige rapport worden alleen de ontwikkelingen in de temperatuur van het Rijnwater in de afgelopen dertig jaar beschreven. Hoge watertemperaturen (boven 25 °C), maar ook lage watertemperaturen (bijv. als er in de winter voor de bekeken periode sprake was van aanhoudend koude watertemperaturen onder 2 °C) kunnen een invloed hebben op organismen en leiden tot een soortenverschuiving in rivieren. Mogelijke effecten van gewijzigde watertemperaturen op de aquatische levensgemeenschap worden beschreven in [ICBR 2013].

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

De eerste geregistreerde gegevens van stelselmatig onderzoek naar de temperatuur van het Rijnwater betreffen de Rijn bij Kehl. Voor de periode 1850-1859 zijn op basis van drie metingen per dag de maandgemiddelden over tien jaar bepaald. Het hiervan afgeleide gemiddelde over tien jaar bedraagt 10,9 °Re (temperatuurschaal van Réaumur, komt overeen met 13,6 °C). Andere waarden zijn uit de periode 1889-1892 bekend voor de Rijn bij Freiburg en Speyer [Forstner 1894] met een gemiddelde over vier jaar van respectievelijk 10,8 en 10,2 °Re (komt overeen met 13,5 en 12,8 °C). Ook toen al werd de ontwikkeling in de loop van de dag en het jaar opgetekend en geïnterpreteerd en werden er vergelijkingen gemaakt om de invloed van de luchttemperatuur op de watertemperatuur vast te stellen.

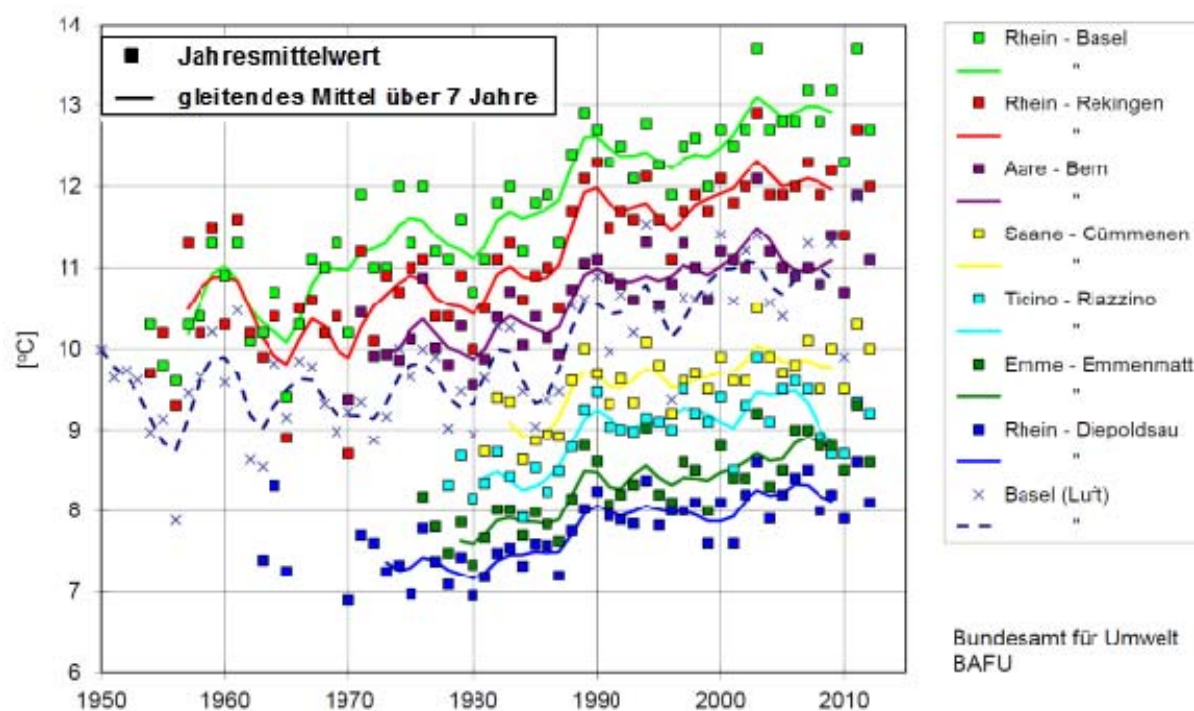
Wundt heeft in de jaren 1940 en 1967 samenvattende rapporten over de watertemperaturen in Midden-Europa gepubliceerd. In het laatstgenoemde rapport wordt er ook rekening gehouden met zeven meetlocaties aan de hoofdstroom en veertien meetlocaties aan de zijrivieren van de Rijn. Voor Maxau wordt er bijvoorbeeld een gemiddelde Rijnwatertemperatuur vermeld van 11,8 °C (tijdreeks 1951/1960), voor Kaub 11,1 °C (tijdreeks 1946/1960) en voor Rees 11,2 °C (tijdreeks 1951/1960). De

waarden zijn afkomstig van dagelijks om 13.00u uitgevoerde individuele metingen. Omdat de ervaring leert dat het daggemiddelde tegen 11.00u wordt bereikt, wordt er op deze waarden een correctiefactor van $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ toegepast. Verder wordt er in dit rapport dieper ingegaan op het verschil tussen water- en luchttemperatuur en op de amplitudes van de maandgemiddelden. [Wundt 1940, 1967].

Na de Tweede Wereldoorlog zijn watertemperatuurgegevens in toenemende mate in meetstations verzameld en geregistreerd in hydrologische jaarboeken. IKSRI n het kader van het internationale Rijnmeetprogramma van de ICBR, dat in 1953 is opgestart, werden de watertemperaturen aanvankelijk om de veertien dagen en later continu gemeten en als gemiddelde over veertien dagen weergegeven (jaarlijkse tabellenboeken van de fysisch-chemische metingen van de ICBR).

Naar de plaats van de watertemperatuur in hydrologische processen heeft Webb fundamenteel onderzoek gedaan; daarbij is hij tot de slotsom gekomen dat de temperatuur van het rivierwater in Europa in de twintigste eeuw met circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ is gestegen [Webb 1996]. De evaluatie van de invloed van klimaatveranderingen wordt ernstig bemoeilijkt door warmtelozingen, verstedelijking (waterzuiveringsinstallaties) en de aanleg van stuwen [Webb 2008].

Sinds de bovengenoemde jaren 2003 en 2006 waarin de watertemperatuur ongekende hoogten bereikte, zijn er tal van studies uitgevoerd naar de ontwikkeling van de temperatuur, die deels ook het Rijngebied betreffen. Zo wordt er in een Zwitsers rapport over de Rijn bij Basel een stijging van de watertemperatuur van $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastgesteld over de afgelopen vijftig jaar [BUWAL 2004]. In figuur 2-1 wordt tevens de ontwikkeling van de jaargemiddelden tot 2012 weergegeven op meerdere Rijnmeetlocaties in het Zwitserse deel van het Rijngebied.



Figuur 2-1: Verandering van de watertemperatuur in geselecteerde meetstations van de Zwitserse dienst voor water en geologie (BWG) in de periode 1954-2012 (vierkantjes = jaargemiddelden; lijnen = voortschrijdende gemiddelden over zeven jaar) inclusief weergave van het verloop van de luchttemperatuur in Basel (stippellijn). Bron: BAFU, afdeling Hydrologie, 5 maart 2013

Voor de Duitse Nederrijn bij Kleef-Bimmen wordt er sinds 1977 een stijging van de gemiddelde watertemperatuur van de Rijn met $> 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastgesteld en een toename van het aantal jaren met maximale watertemperaturen boven $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. De temperatuurstijging

is zeer waarschijnlijk te wijten aan de klimaatverandering, omdat de vergunde warmtelozingen op de Rijn tegelijkertijd zijn afgenomen [MUNLV 2009].

Op basis van de gegevens van het meetstation Lobith wordt er aangenomen dat de watertemperatuur in de Rijn bij Lobith in de periode 1908-2000 met meer dan 3 °C is gestegen [Liefveld & Postma 2007].

Andere onderzoeken die kunnen worden genoemd:

- Deltares heeft onlangs in opdracht van de Nederlandse overheid (Rijkswaterstaat Waterdienst) onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van de watertemperatuur in het Nederlandse stroomgebied van de Maas vanuit het oogpunt van antropogene invloeden en klimatologische veranderingen [Deltares 2012]. Dit stroomgebied grenst direct aan het gebied van de Duitse Nederrijn, wat betekent dat de bevindingen uit de Deltares-studie deels ook kunnen gelden voor het Nederrijngebied.
- Haag legt uit welke invloed de klimaatverandering kan hebben op de temperatuur van rivieren en geeft een samenvatting van de tot dusver behaalde resultaten van wetenschappelijk onderzoek naar het effect van de klimaatverandering op watertemperaturen [Haag 2009]. Er wordt zowel gerefereerd aan onderzoeken naar de historische ontwikkeling als aan prognoses van de toekomstige ontwikkeling van de watertemperatuur.
- In 2009 is er ook een studie verschenen van de Duitse Bond voor milieu en natuurbescherming (BUND) in verband met de thermische belasting van de Rijn [Lange 2009] waarvoor er uitvoerig research is gedaan naar warmtelozingen en geplande energiecentrales aan de Rijn. De studie is bedoeld als basis voor een in de context van de beheerplannen conform EU-Kaderrichtlijn Water uit te voeren, goed onderbouwde analyse van de gevolgen van de geplande aanleg van energiecentrales waarin er rekening wordt gehouden met de klimaatverandering.

De meest omvattende analyses van langjarige reeksen van watertemperatuurgegevens zijn de afgelopen jaren gerealiseerd door Greis en Strauch [Greis 2007], [Strauch 2011], [Greis et al. 2011], die het temperatuurgerelateerd terugschroeven van de productiecapaciteit van thermische centrales in Duitsland op de voorgrond hebben geplaatst. In deze onderzoeken zijn er ook grote delen van het Rijngebied bekeken. Voor enkele meetstations is de gebruikte gegevensbasis identiek aan de gegevensbasis voor het onderhavige rapport. Verder zijn er significante trends in de watertemperaturen van geselecteerde rivieren in Duitsland weergegeven en effecten besproken van het veranderende afvoerregime [Rothstein et al. 2008].

3. Continue meting van de watertemperatuur

In de eerste helft van de twintigste eeuw zijn er in de hydrologische jaarboeken voor de Rijn alleen dagelijkse, niet-continue metingen opgetekend (meestal de waarde van 12.00u).

De continue meting van de watertemperatuur met behulp van temperatuurvoelers (bijv. Pt100-sensoren) en de vastlegging van het meetsignaal op meetstroken begon ongeveer vijftig jaar geleden. Pas sinds ongeveer twee decennia worden de meetsignalen direct digitaal geregistreerd en opgeslagen. Voor enkele meetstations zijn de meetstroken achteraf na een plausibiliteitscontrole gedigitaliseerd, zodat er voor een periode van 30 à 35 jaar daggemiddelde watertemperaturen beschikbaar zijn.

Hieronder wordt er ingegaan op de techniek voor temperatuurmeting, de omgang met gegevenslacunes en het tijds kader van de beschikbare gegevensbasis. Er zij op gewezen dat temperatuurverschillen in het onderhavige rapport in principe worden uitgedrukt in °C en niet, zoals in de literatuur gebruikelijk, in Kelvin.

3.1 Meettechniek

Tot de meettechniek behoren de temperatuursensor, de meetapparatuur, de systemen voor gegevensoverdracht en de controle. De meettechniek heeft bijgevolg betrekking op de meetopstelling in het water en/of het meetstation.

Sinds vele jaren worden er op de meetlocaties Pt100- of NTC-temperatuursensoren gebruikt met een nauwkeurigheid (in het gebruikelijke temperatuurmeetgebied) tussen 0,1 °C en 0,25 °C. Voor de gehele meetketen (meetapparatuur en gegevensoverdracht) wordt er ook een nauwkeurigheid van 0,1 °C aangegeven. Het is cruciaal dat er regelmatig (bijv. maandelijks) onderhoud en kalibratie plaatsvindt. De nauwkeurigheid van de temperatuurmeting ligt dan tussen 0,1 °C en 0,3 °C. Afwijkingen tot 0,5 °C zijn mogelijk als kalibratie-intervallen niet worden nageleefd.

Als het meetpunt in het meetstation ligt, moet de invloed van de pijpleiding bekend zijn om de gegevenskwaliteit te waarborgen.

3.2 Omgang met gegevenslacunes en homogenisering van de tijdreeksen

Voor langjarige trendanalyses moeten er equidistante tijdreeksen zonder gegevenslacunes (daggemiddelden) beschikbaar zijn. Dit kan worden bereikt door middel van lineaire interpolatie (bij kleine lacunes van 1 à 2 dagen) of beter nog door middel van grafische vergelijking met naburige stations. Ontbrekende waarden kunnen ook bij benadering worden berekend met een reeds gevalideerd model.

Als bijvoorbeeld in twee aangrenzende stations 3% (elf waarden) van de daggemiddelden in een jaar ontbreekt en de waarden in één station in de zomer en in het andere in de winter ontbreken, dan kunnen de jaargemiddelden 0,5 tot 0,7 °C van elkaar afwijken, hoewel in feite voor beide stations hetzelfde jaargemiddelde geldt. De afwijking kan per station 0,3-0,4 °C bedragen.

Onder het homogeniseren van tijdreeksen verstaat men het controleren op systematische fouten die bijv. kunnen ontstaan door de verandering van de meettechniek, de verplaatsing van het meetpunt of de wijziging van de omgevingsfactoren. De fouten kunnen zichtbaar worden in een verschuiving of trend, die echter overlapt met de natuurlijke variabiliteit en de trend in de watertemperatuur. De statistische methode, meer bepaald de relatieve homogeniteitstest met behulp van referentietijdreeksen die zijn gemiddeld op basis van naburige vergelijkingsreeksen, wordt uitvoerig beschreven in Strauch [Strauch 2011] en is toegepast op meetreeksen van de Rijn, de Neckar en de Main. In het kader van het onderhavige rapport zijn er slechts visuele controles en plausibiliteitsanalyses uitgevoerd tussen de tijdreeksen van naburige stations.

3.3 Tijds kader van de gegevensbasis

De beheerders van meetlocaties hebben ten behoeve van de verificatie van temperatuurtrends langjarige meetreeksen op daggemiddeldebasis (en deels ook op uurbasis) beschikbaar gesteld. In het onderhavige rapport is er gebruik gemaakt van de volgende meetreeksen:

Tabel 3.3-1: Overzicht van de tijdreeksen van de watertemperatuur (WT) (daggemiddelden op basis van continue meting)

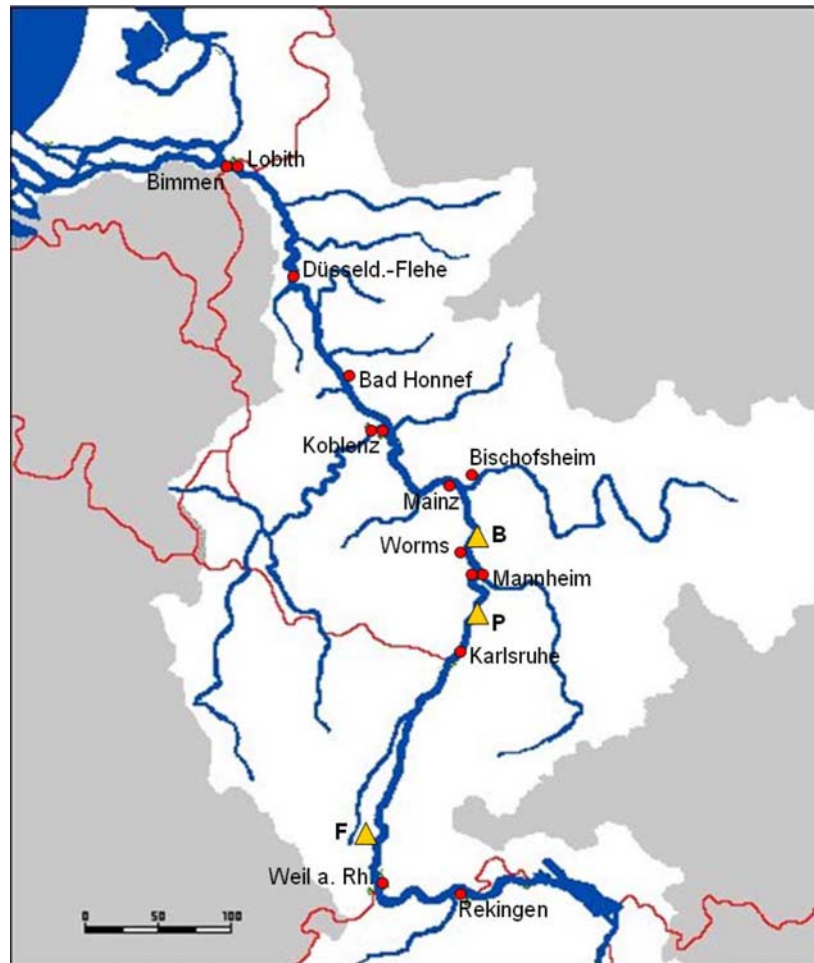
WT-meetlocaties	Rivier (km)	WT-tijdreeks	Bron
Rekingen*	Rijn, km 90,7	1997-2011	BAFU
Weil am Rhein*	Rijn, km 174,0	1997-2011	BAFU
Karlsruhe*	Rijn, km 359,2	1988-2011	LUBW
BASF PBS zuid	Rijn, km 426	1991-2011	BASF
Mannheim	Neckar, km 3,0	2000-2010	LUBW
Worms	Rijn, km 443,3	1996-2009	LUWG
Bischofsheim	Main, km 4,0	2000-2010	HLUG
Mainz	Rijn, km 498,5	1980-2011	LUWG
Koblenz/Rijn*	Rijn, km 590,3	1978-2011	BfG
Koblenz/Moezel*	Moezel, km 2,0	1978-2011	BfG
Bad Honnef	Rijn, km 640,0	2004-2010	LANUV
Düsseldorf-Flehe	Rijn, km 732,2	2004-2010	LANUV
Kleef-Bimmen*	Rijn, km 865,0	1995-2009	LANUV
Lobith*	Rijn, km 862,3	2000-2010	RWS

* Internationale meetlocaties van het ICBR-meetprogramma

Voor de plausibiliteitscontrole en de aanvulling van gegevenslacunes is er tevens gebruik gemaakt van de continue WT-gegevens van de meetpunten Koblenz, Keulen en Rees en van de gegevens van de meetstations Fankel/Moezel en Lahnstein/Lahn.

Verder heeft de BASF de innametemperaturen van het pomp- en behandelstation zuid (Rijnkm 426) beschikbaar gesteld op uurbasis (2000-2011) dan wel op daggemiddeldebasis (1991-1999) of maandgemiddeldebasis (1952-1990). Deze gegevenssets zijn ook bijzonder geschikt voor langjarige trendanalyses.

In de onderstaande figuur 3.3-1 wordt de ligging van de meetlocaties uit tabel 3.3-1 weergegeven aan de Rijn.



Figuur 3.3-1: Ligging van de meetlocaties met watertemperatuurgegevens (rode stippen) die de gegevensbasis vormen voor het onderhavige rapport. (Ligging kerncentrales (gele driehoeken): F=Fessenheim, P=Philippsburg, B=Biblis)

4. Onderzoek naar de representativiteit van de temperatuurgegevens van de meetstations

Om een betrouwbare inschatting te kunnen maken van de ontwikkeling van de temperatuur in de loop van de Rijn moeten de in de meetstations vastgestelde watertemperaturen gegarandeerd ook representatief zijn voor de dwarsdoorsnede van het waterlichaam. Daarom worden er in de meetstations Weil am Rhein, Worms en Mainz op meerdere punten in het dwarsprofiel metingen verricht (aan brugpijlers).

Voor het meetstation Worms is gebleken dat als gevolg van grote warmtelozingen bovenstrooms van de meetlocatie en de uitmonding van de Neckar er ongeveer een derde van het jaar een temperatuurverschil bestaat tussen de linker- en de rechteroever van 1 à 2 °C.

De representativiteit van de gegevens wordt gegarandeerd door vergelijkende metingen in het dwarsprofiel of door vergelijking van de resultaten met naburige meetstations.

Voor een selectie van meetstations zijn de temperatuurgegevens gecontroleerd op representativiteit met behulp van de langjarige dwarsprofielmetingen van het meetschip Burgund op negen profielen van Rijnkm 355 (Neuburg) tot Rijnkm 638 (Oberwinter).

Dit wordt nader toegelicht aan de hand van het voorbeeld van het meetstation Karlsruhe (Rijnkm 359,2, rechteroever). Hiervoor worden de resultaten van de

dwarsprofielmetingen die de Burgund in de periode 2003-2008 ter hoogte van Rijnkm 355,4 vier keer per jaar heeft gerealiseerd, vergeleken met de uurgemiddelden van het meetstation op het tijdstip in kwestie (een dwarsprofielmeting duurt ongeveer 8-12 minuten). De gemiddelde resultaten van 21 metingen in tabel 4-1 laten zien:

- a) dat de temperatuurverdeling in het dwarsprofiel op dit Rijntraject zeer homogeen is en het meetstation Karlsruhe dus representatieve gegevens levert;
- b) dat de afwijkingen van de twee onafhankelijke metingen binnen de meetnauwkeurigheid vallen, d.w.z. naar dezelfde (juiste) waarde leiden.

Tabel 4-1 Rijn-WT op vijf meetpunten; meting vanaf Burgund links, midden, rechts en vergelijking met overeenkomstige uurgemiddelden van het meetstation (bijv. Rijnkm 359,2, rechts).

N = aantal gerealiseerde dwarsprofielmetingen.

WT in °C	N	linkeroever	midden	rechteroever
Oberwinter, km 638 gemiddelde 2003-2007 Station Bad Honnef, km 640	15	13,66	13,71	13,74 13,67
Lahnstein, km 585 gemiddelde 2004-2008 Station Koblenz/Rijn, km 590,3	20	14,18 14,24	14,21	14,20
Mainz-Weisenau, km 496 gemiddelde 2004-2008 Station Mainz, km 498,5	19	14,62 14,68	14,76	14,82
Ludwigshafen, km 424,6 gemiddelde 2004-2008 BASF PBS zuid, km 426	20	13,33	13,55 13,58	13,96
Neuburg, km 355,4 gemiddelde 2003-2008 Station Karlsruhe, km 359,2	21	13,73	13,69	13,68 13,80

Ook op de andere vier meetpunten in tabel 4-1 komen de scheepsmetingen zeer goed overeen met de resultaten van het meetstation op de oever.

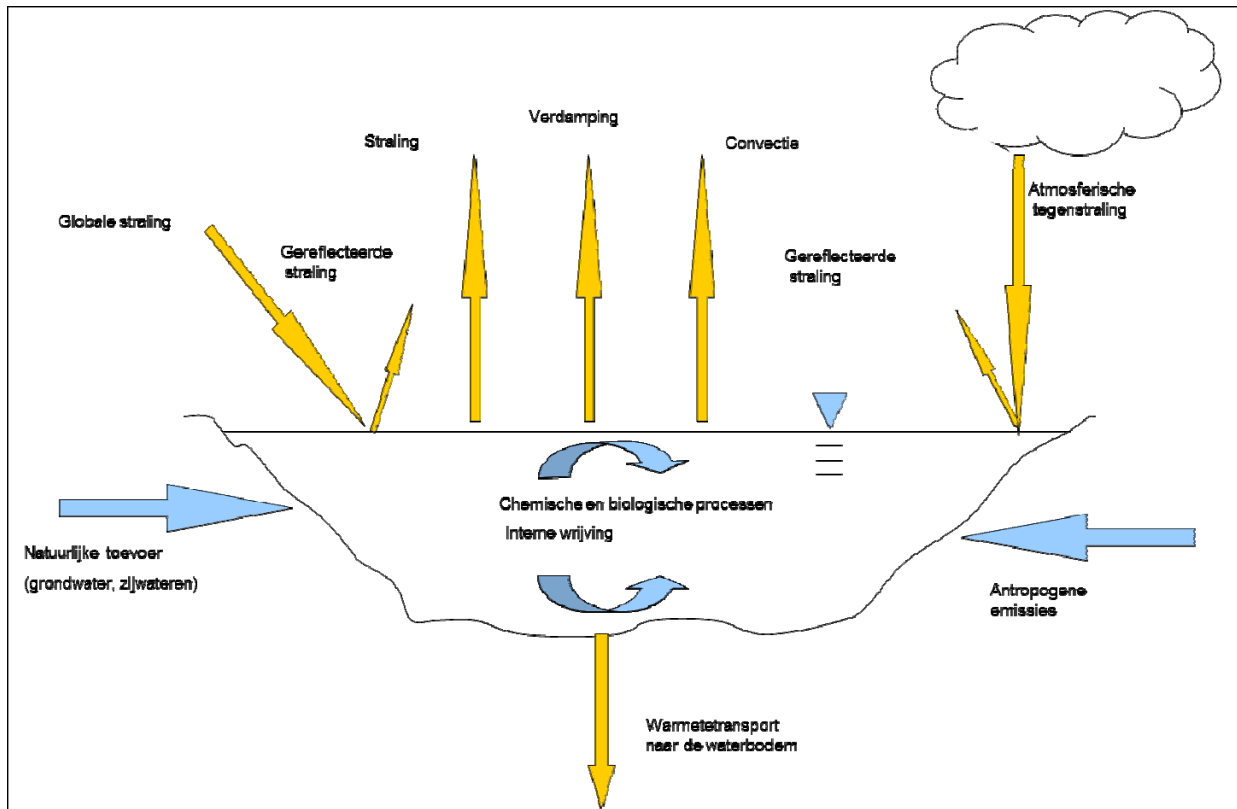
Dat betekent dat er ook voor de meetstations Bad Honnef en Koblenz uniforme watertemperaturen over de breedte van de rivier beschikbaar zijn. Bij Mainz is het dwarsprofiel direct voor de monding van de Main in de Rijn gemeten. Het meetstation Mainz ligt 2,5 km benedenstrooms van de monding van de Main en registreert de watertemperatuur op vier aan brugpijlers aangebrachte meetpunten in het dwarsprofiel. Voor het onderhavige rapport is er enkel gebruik gemaakt van de daggemiddelden van de meetpunten 1 en 2, die dicht bij de linkeroever liggen, omdat alleen deze punten de watertemperatuur van de Rijn zonder de invloed van de Main weergeven (zie hoofdstuk 5.6). Uit de gegevens blijkt dat de meetpunten in het dwarsprofiel bij Ludwigshafen aan de rechteroever worden beïnvloed door warmtelozingen van energiecentrales (zie ook hoofdstuk 5.7).

5. Analyse van de tijdreeksen van de watertemperatuur

5.1 Invloedsfactoren op de temperatuur van rivieren

De fysische achtergrond van de componenten van de warmtehuishouding wordt uitvoerig beschreven in [Haag 2009] en [LAWA 2012]. Daarom wordt er hier aan de hand van figuur 5.1-1 alleen kort ingegaan op de relevante factoren.

De natuurlijke watertemperatuur wordt grotendeels bepaald door meteorologische componenten, zoals de warmte-uitwisseling tussen water en omgeving en de afvoer.



Figuur 5.1-1: Schematische voorstelling van de warmte-uitwisselingsprocessen die relevant zijn voor rivieren (naar LAWA 2012)

De kortgolvlige stralingsbalans is het resultaat van de inkomende globale straling (directe en diffuse zonnestraling) en het aandeel dat wordt teruggekaatst door het wateroppervlak (albedo). De langgolvlige stralingsbalans resulteert uit de binnenvallende warmtestraling uit de atmosfeer en de straling die het water uitzendt als gevolg van zijn eigen temperatuur.

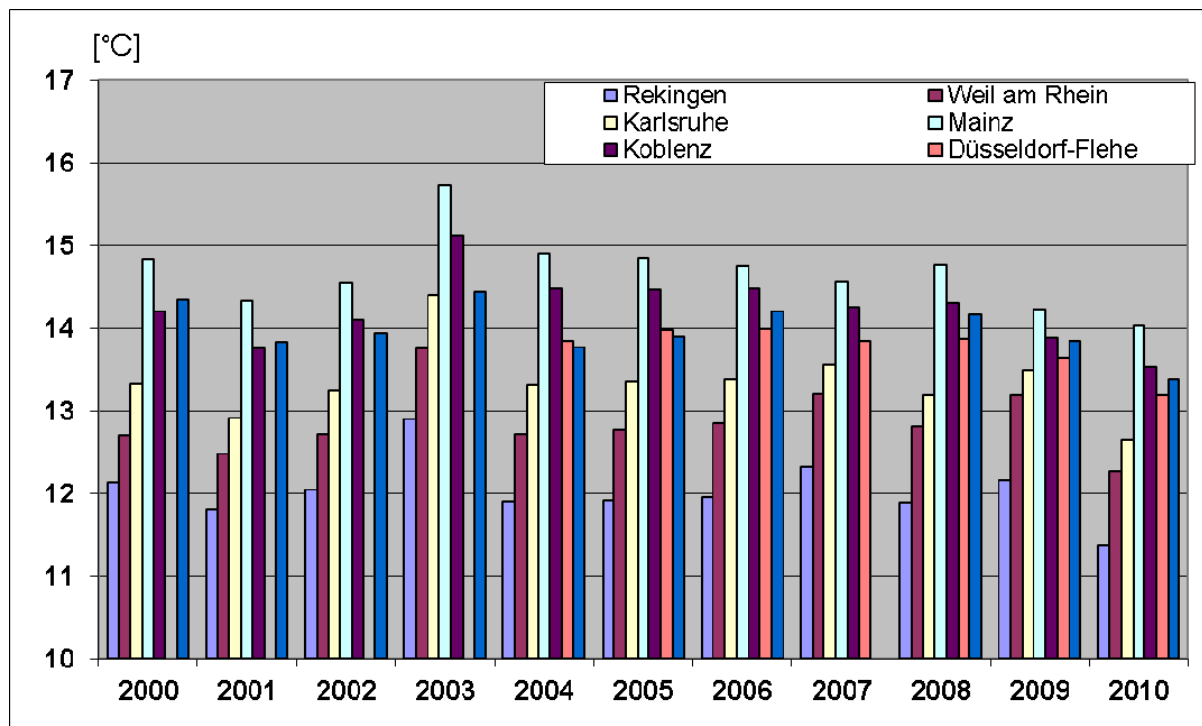
Verdamping is de component van de warmtebalans met de grootste invloed op de afkoeling van het water. Als de dampdruk aan het wateroppervlak lager is dan in de luchtlaag erboven vindt er condensatie plaats.

Convectie is de directe overdracht van warmte tussen het wateroppervlak en de lucht. De omvang ervan is afhankelijk van de temperatuurgradiënt tussen het wateroppervlak en de omgevende lucht. Verdamping en convectie worden sterk beïnvloed door de windsnelheid.

Daar waar rivieren ontspringen, komt de riviertemperatuur overeen met de temperatuur van het grondwater. Hoe verder van de bron vandaan hoe hoger doorgaans de jaargemiddelde watertemperatuur en hoe groter de jaarlijkse en dagelijkse temperatuuramplitude [LAWA 2012, p. 47]. Voor de Hoogrijn gelden de bijzondere kenmerken aan de uitloop van een meer: in koude winters daalt de temperatuur aan de overgang van het Bodenmeer naar de Rijn amper onder 4 °C, terwijl in hete zomermaanden de oppervlaktewatertemperatuur van het Bodenmeer bepalend wordt.

5.2 Temperatuurontwikkeling in de loop van de Rijn

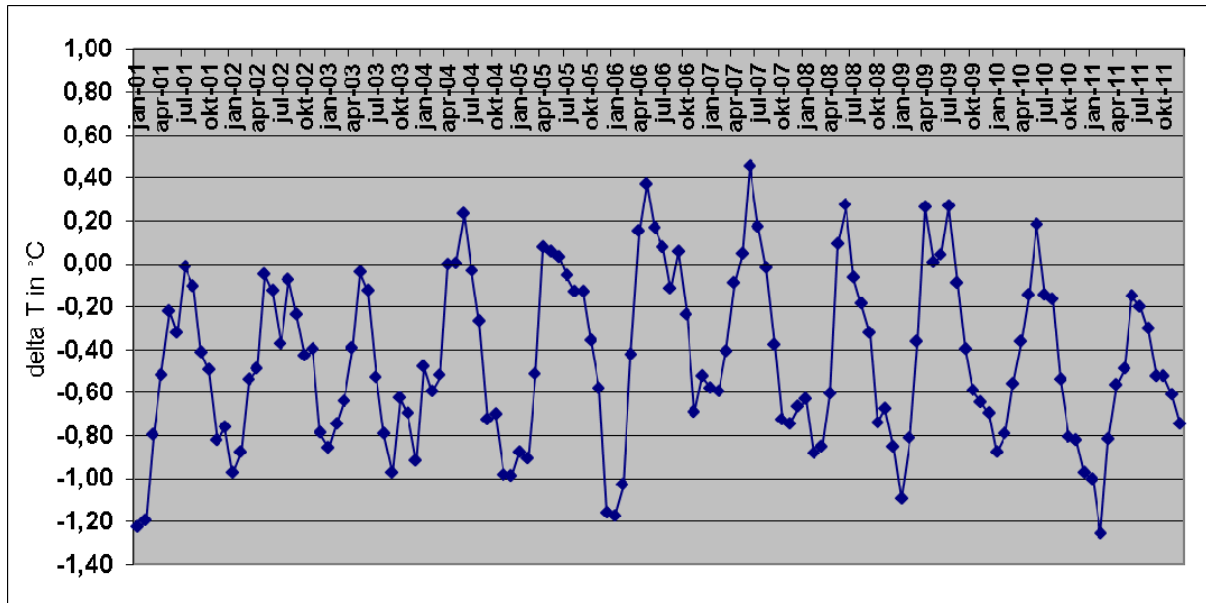
Bij wijze van eerste overzicht wordt in figuur 5.2-1 de jaargemiddelde temperatuur van het Rijnwater in de jaren 2000-2010 weergegeven voor de ICBR-meetstations van Rekingen (bovenstrooms van de monding van de Aare in de Hoogrijn) tot Lobith (aan de Duits-Nederlandse grens). In deze periode stijgt de temperatuur van het Rijnwater tussen beide stations met gemiddeld bijna 2 °C, met een mogelijke variatie van jaar tot jaar tussen 1,5 °C (in 2003) en 2,3 °C (in 2008). Tussen de stations Rekingen en Karlsruhe en tussen Karlsruhe en Mainz stijgt de temperatuur telkens met gemiddeld 1,3 °C (over de afgelopen twintig jaar bedraagt de gemiddelde temperatuurstijging tussen Karlsruhe en Mainz zelfs 1,5 °C). Dit temperatuurverschil kan grotendeels door de grote koelwaterlozingen op het traject tussen Karlsruhe en Worms worden verklaard en deels door de natuurlijke opwarming in de loop van de rivier (zie hieronder). Volgens de ICBR-inventarisatie van de warmtelozingen vindt ongeveer 60% van de warmte-emissies op de Rijn op dit traject plaats [ICBR 2006].



Figuur 5.2-1: Jaargemiddelde Rijnwatertemperatuur in meetstations langs de Rijn

Echter, in Koblenz is de waarde gemiddeld weer 0,4 °C lager als gevolg van afkoelingsprocessen en aanpassing aan de luchttemperatuur. Stroomafwaarts tot Bad Honnef daalt de watertemperatuur verder met ongeveer 0,3 à 0,4 °C. Deze afkoeling is ook te wijten aan de vermenging met water uit de Moezel en andere kleine rivieren uit het middelgebergte, die bijv. in de winter tot 4 °C kouder zijn dan de Rijn. In Bad Honnef, Keulen, Düsseldorf-Flehe en Lobith liggen de temperaturen op nagenoeg hetzelfde niveau, wat betekent dat inkomende warmte en afkoelingsprocessen elkaar op dit traject in evenwicht houden.

In figuur 5.2-2 wordt het temperatuurverloop gedetailleerder weergegeven met het maandgemiddelde temperatuurverschil tussen Mainz en Koblenz in de jaren 2001-2011. De verdere afkoeling van het Rijnwater tussen Mainz en Koblenz kent een zeer grillige ontwikkeling in de loop van het jaar; in enkele maanden in de lente/zomer warmt het water zelfs verder op. Hier wordt de dominante invloed van de stralingscomponenten in de warmtebalans zichtbaar.

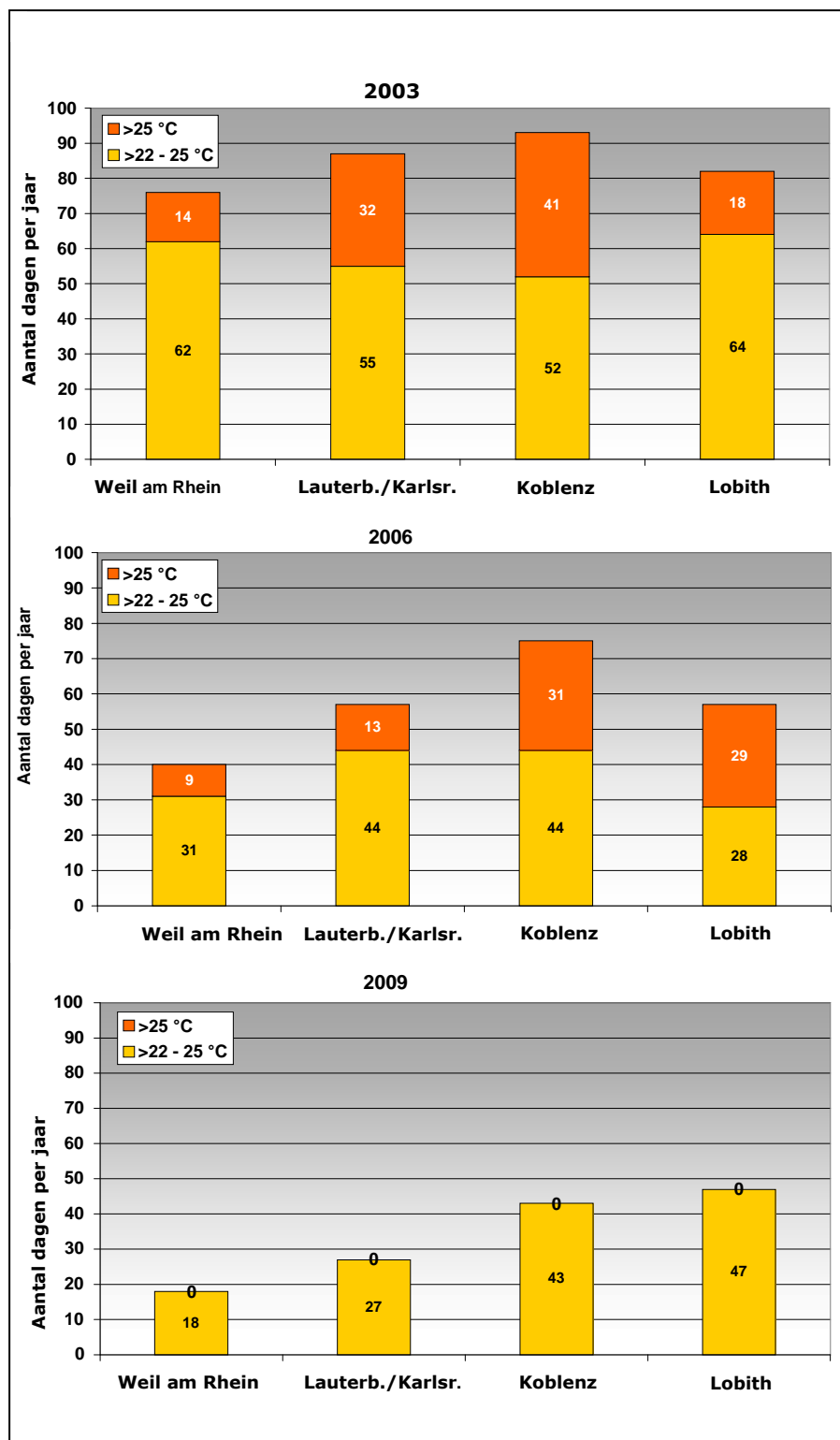


Figuur 5.2-2: Verloop van het maandgemiddelde temperatuurverschil tussen Mainz en Koblenz in de jaren 2001-2011 ($\Delta T = T(\text{KO}) - T(\text{MZ})$)

Op het traject tussen Bazel en Karlsruhe stroomt de Rijn door de regio met de hoogste gemiddelde luchttemperaturen in het Rijngebied. Daarbij komt dat de vele stuwen op dit Rijntraject de temperatuuruitwisseling met de atmosfeer bevorderen. Als gevolg hiervan wordt de temperatuurstijging tot Karlsruhe slechts in zeer beperkte mate door directe warmtelozingen en waarschijnlijk veel meer door natuurlijke processen veroorzaakt, die op hun beurt echter weer worden versterkt door antropogene invloeden (zie ook hoofdstuk 5.7).

5.3 Frequentieanalyse (extreme waarden)

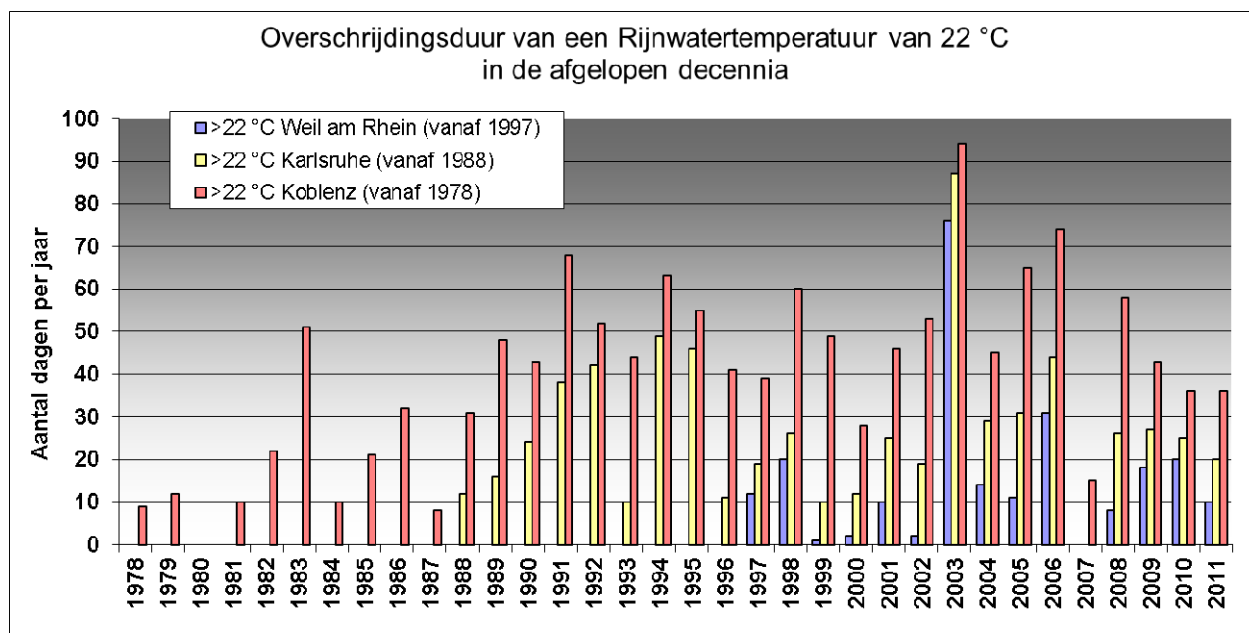
Een eerste en robuuste evaluatie van tijdreeksen van de temperatuur gebeurt door middel van telstatistiek. Daarbij wordt over een periode van meerdere jaren het aantal dagen bepaald waarop een bepaalde extreme waarde of drempelwaarde wordt over- dan wel onderschreden. In figuur 5.3-1 is bijvoorbeeld zowel in 2003 als in 2006 in de loop van de Rijn tot Koblenz een duidelijke toename te zien van het aantal dagen met watertemperaturen boven 22 °C en ook 25 °C. In 2009 is er in het gehele Rijngebied tot Lobith daarentegen geen daggemiddelde watertemperatuur boven 25 °C gemeten.



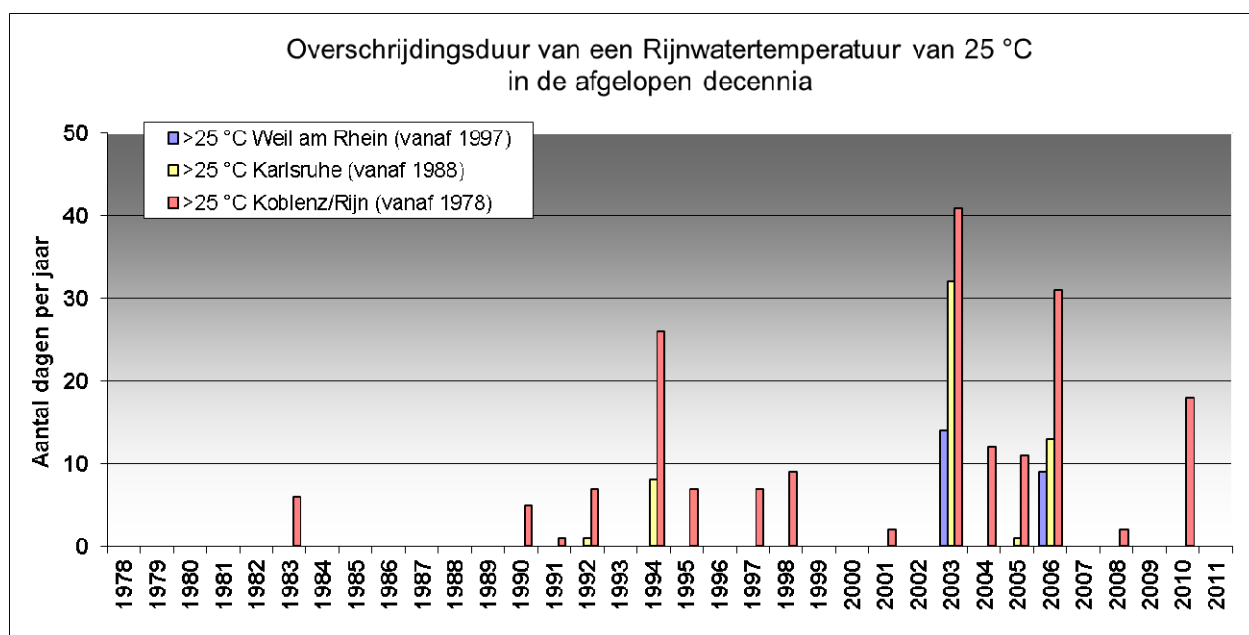
Figuur 5.3-1: Aantal dagen in 2003, 2006 en 2009 waarop de temperatuur van het Rijnwater hoger was dan 22 °C

Terwijl watertemperaturen boven de 22 °C zich de afgelopen decennia vaak hebben voorgedaan (figuur 5.3-2), zijn temperaturen boven de 25 °C de afgelopen twaalf jaar in zeven jaren gemeten (voor Koblenz, zie figuur 5.3-3), maar in de periode 1978-1989 in slechts één jaar. Voor de meetlocaties Karlsruhe en Weil am Rhein kunnen er wegens

gebrek aan gegevens geen uitspraken worden gedaan over de periodes 1978-1987 en 1978-1996 (zie figuren 5.3-2 en 5.3-3).



Figuur 5.3-2: Overschrijdingsduur van een Rijn-WT van 22 °C in de afgelopen drie decennia

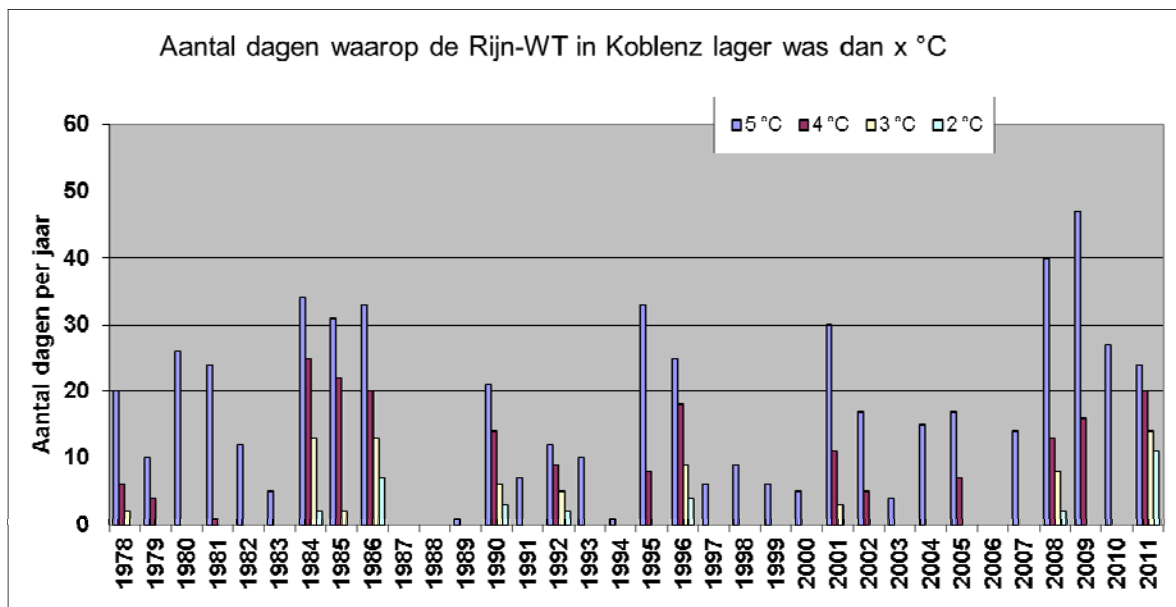


Figuur 5.3-3: Overschrijdingsduur van een Rijn-WT van 25 °C in de afgelopen drie decennia

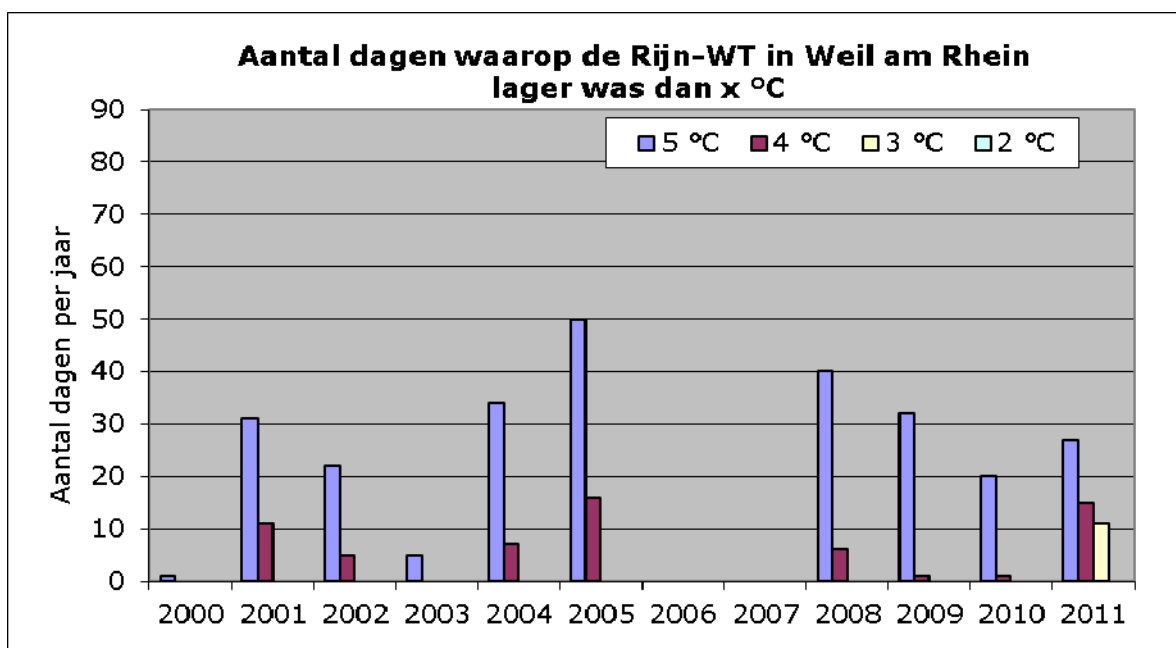
In 2007 zijn er in Koblenz ook in april drie weken lang (tot begin mei) hoge watertemperaturen gemeten (tot boven 20 °C), die 5 °C boven het langjarige gemiddelde voor deze periode lagen. Deze overschrijding is vergelijkbaar met de extreme situatie in de zomer van 2003 en 2006.

In figuur 5.3-4 wordt voor Koblenz/Rijn weergegeven hoe lang de watertemperatuur in de wintermaanden van de periode 1978-2011 onder bepaalde temperaturen lag. Hier valt op dat de watertemperatuur in de winter van 2011/2012 elf dagen lager was dan 2 °C. Dit is de langste periode in de bekeken 34 jaar. De afname van de warmtelozingen tussen Karlsruhe en Worms in 2011 (zie hoofdstuk 6) zou het resultaat mee kunnen

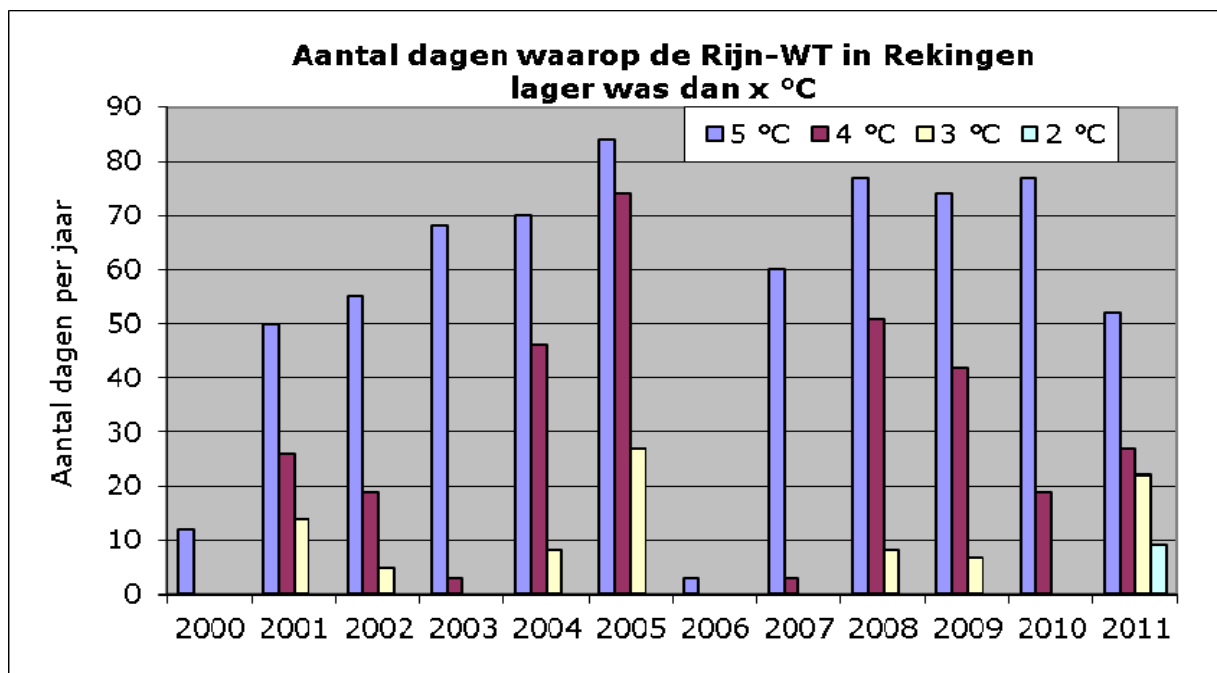
hebben beïnvloed. Om hier meer licht op te werpen, moeten er nog meer stations met WT-gegevens uit 2012 worden meegenomen in de evaluatie.



Figuur 5.3-4: Aantal dagen waarop de Rijn-WT in Koblenz in de jaren 1978-2011 lager was dan x °C



Figuur 5.3-5: Aantal dagen waarop de Rijn-WT in Weilam Rhein in de jaren 2000-2011 lager was dan x °C



Figuur 5.3-6: Aantal dagen waarop de Rijn-WT in Rekingen in de jaren 2000-2011 lager was dan x °C

Bij een vergelijking van de resultaten van de evaluatie voor de stations Weil am Rhein en Rekingen vallen vooral de warme winters van 2006/2007 en 2000/2001 op, toen de Rijn-WT bijna altijd boven de 5 °C lag. Echter, in de winter van 2011/2012 zijn er ook temperaturen onder de 2 °C bereikt.

5.4 Trendanalyse

Om uitspraken te kunnen doen over de ontwikkeling van de watertemperatuur van de Rijn in de afgelopen decennia zijn er geselecteerde WT-tijdreeksen onderzocht op trends. Daarbij is er gebruik gemaakt van de Mann-Kendall-trendtest, die geen normaalverdeling of lineariteit in trends vereist. Niet alleen de richting van de trend is berekend, maar ook de significantie en omvang ervan. In tabel 5.4-1 zijn er voor meetlocaties met lange tijdreeksen trends weergegeven, gerelateerd aan jaargemiddelden en seizoenen.

Tabel 5.4-1: Trendevaluatie voor geselecteerde tijdreeksen met de Mann-Kendall-trendtest

Meetstation	Tijdreeks	Significante trend (%)	Stijging/daling van de WT in °C	Gemiddelde (tijdsreferentie)
Rekingen	1978-2011	99,9	1,7	jaargemiddelde
BASF PBS zuid	1978-2011	99,9	2,2	jaargemiddelde
Mainz	1980-2011	99	1,3	jaargemiddelde
Koblenz/Rijn	1978-2011	99,9	1,2	jaargemiddelde
Rekingen	1989-2011	-	0,5	jaargemiddelde
BASF PBS zuid	1989-2011	95	0,9	jaargemiddelde
Mainz	1989-2011	-	-0,2	jaargemiddelde
Koblenz/Rijn	1989-2011	-	0,01	jaargemiddelde
Koblenz/Rijn	1978-2011	99	1,7	voorjaar

Meetstation	Tijdreeks	Significante trend (%)	Stijging/daling van de WT in °C	Gemiddelde (tijdsreferentie)
Koblenz/Rijn	1978-2011	99,9	2,3	zomer
Koblenz/Rijn	1978-2011	-	0,6	najaar
Koblenz/Rijn	1978-2011	-	-0,3	winter
BASF PBS zuid	1978-2011	99,9	2,7	voorjaar
BASF PBS zuid	1978-2011	99,9	2,6	zomer
BASF PBS zuid	1978-2011	95	1,1	najaar
BASF PBS zuid	1978-2011	95	1,4	winter
Koblenz/Rijn	1989-2011	-	-0,2	voorjaar
Koblenz/Rijn	1989-2011	-	-0,2	zomer
Koblenz/Rijn	1989-2011	-	0,5	najaar
Koblenz/Rijn	1989-2011	-	-0,9	winter
BASF PBS zuid	1989-2011	-	0,6	voorjaar
BASF PBS zuid	1989-2011	-	0,6	zomer
BASF PBS zuid	1989-2011	-	0,4	najaar
BASF PBS zuid	1989-2011	-	0,1	winter

De evaluatie van de tijdreeksen van 1978 tot 2011 toont voor deze periode een temperatuurstijging van 1,7 °C in Rekingen (Hoogrijn), 1,3 °C in Mainz (Duitse Bovenrijn) en 1,2 °C in Koblenz (Middenrijn). In de zomermaanden liggen de waarden duidelijk boven 2 °C. De stijgende trend ontwikkelt zich echter niet lineair over de gehele periode (1978-2011), maar resulteert hoofdzakelijk uit een stijging in de jaren 1987-1989. Uitgaande van de tijdreeksen van 1978 tot 2011 is de trend naar hogere temperaturen vrij sterk, maar uitgaande van de periode 1989-2011 of van kortere tijdreeksen is de trend slechts zeer zwak of geheel afwezig.

Op basis van de beschikbare tijdreeks van daggemiddelden (1997-2010) voor Rekingen (Hoogrijn) kon er evenmin een significante trend worden waargenomen, noch in de jaargemiddelden, noch in de seizoenen (tabel 5.4-2). Voor de wintermaanden is er zelfs een temperatuurdaling vastgesteld, evenwel ook zonder significante trend.

Tabel 5.4-2: Trendevaluatie voor geselecteerde korte tijdreeksen met de Mann-Kendall-trendtest

Meetstation	Tijdreeks	Significante trend (%)	Stijging/daling van de WT in °C	Gemiddelde (tijdsreferentie)
Rekingen	1997-2010	-	0,3	jaargemiddelde
BASF PBS zuid	1997-2010	-	0,4	jaargemiddelde
Koblenz/Rijn	1997-2010	-	-0,3	jaargemiddelde
Rekingen	1997-2010	-	-0,4	voorjaar
Rekingen	1997-2010	-	0,7	zomer
Rekingen	1997-2010	-	0,6	najaar
Rekingen	1997-2010	-	-0,9	winter

Meetstation	Tijdreeks	Significante trend (%)	Stijging/daling van de WT in °C	Gemiddelde (tijdsreferentie)
BASF PBS zuid	1997-2010	-	0,00	voorjaar
BASF PBS zuid	1997-2010	-	1,1	zomer
BASF PBS zuid	1997-2010	-	0,00	najaar
BASF PBS zuid	1997-2010	-	-0,3	winter
Koblenz/Rijn	1997-2010	-	-0,8	voorjaar
Koblenz/Rijn	1997-2010	-	0,7	zomer
Koblenz/Rijn	1997-2010	-	0,1	najaar
Koblenz/Rijn	1997-2010	-	-1,1	winter

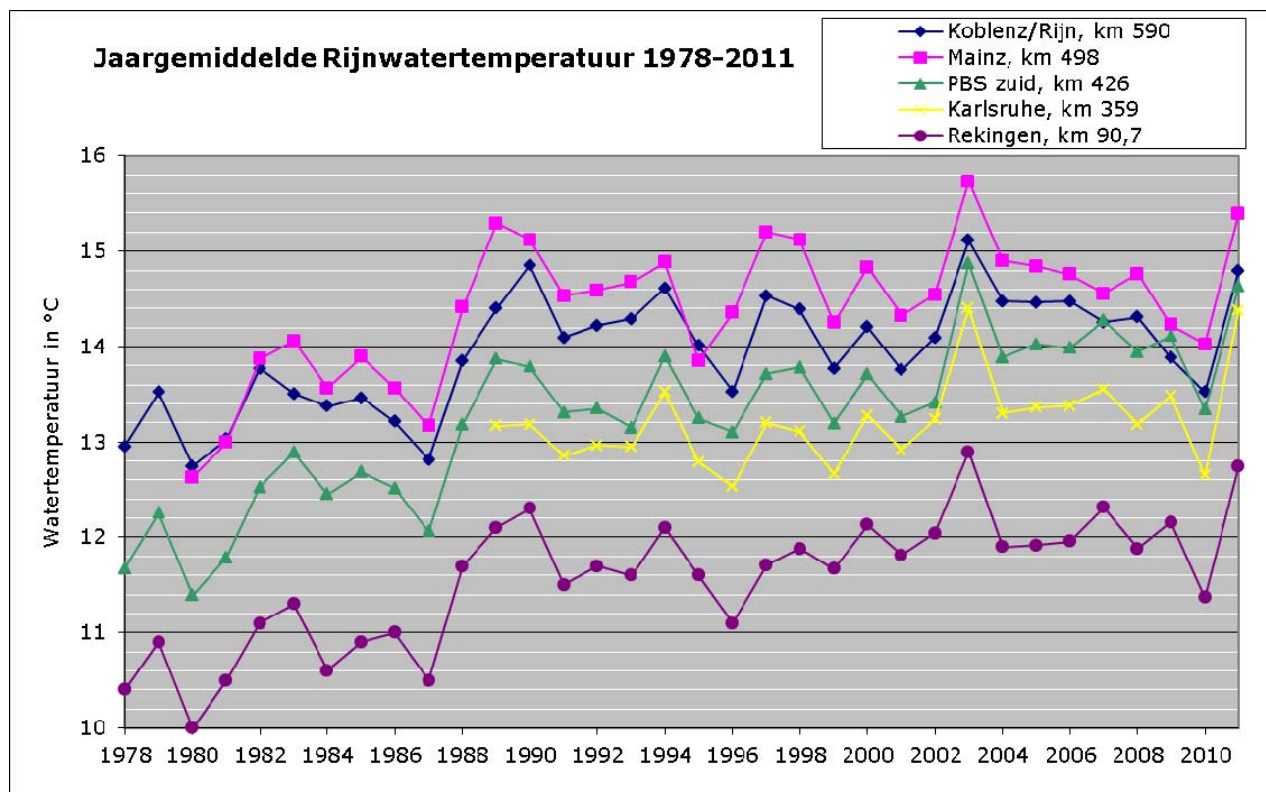
Uit de trendevaluatie blijkt dat er zeer uiteenlopende resultaten kunnen worden verkregen naargelang van de gebruikte tijdreeksen.

Daarom is de aanvullende figuur 5.4-1 opgenomen met een grafische voorstelling van het verloop van het jaargemiddelde in vijf stations langs de Rijn (periode 1978-2011).

De luchttemperatuur heeft de grootste invloed op de watertemperatuur (zie hoofdstuk 5.5), zoals duidelijk tot uitdrukking komt in de gelijkmatige ontwikkeling van de waarden in de loop van de Rijn. Ook de grote koelwaterlozingen op het traject tussen Karlsruhe en Mainz (zie hoofdstuk 5.7) zijn goed waarneembaar. De duidelijke, abrupte stijging in de jaargemiddelde watertemperatuur tussen 1987 en 1989 wordt nog versterkt door de sterke daling van de jaarafvoer in deze drie jaren.

Deze stijging wordt in dezelfde periode ook waargenomen in andere meetstations aan de Rijn en zijn zijrivieren en moet daarom worden beschouwd als een klimaatfenomeen. Hari [Hari et al. 2006] heeft in de langjarige evaluaties van alpiene rivieren in Zwitserland al gewezen op dit klimateffect, dat wordt toegeschreven aan de zogenaamde Noord-Atlantische oscillatie (NAO), die in deze periode bijzonder sterk was. Hiermee worden grote luchtdrukverschillen boven de Noord-Atlantische Oceaan bedoeld die ervoor zorgen dat er vooral in de winter meer warme zeelucht wordt aangevoerd naar West-Europa. Wat niet kan worden verklaard, is waarom de NAO-index de jaren daarop lager was, terwijl de lucht- en watertemperaturen hoog bleven (zie figuur 5.5-1).

Een en ander betekent dat afhankelijk van het feit of een tijdreeks al dan niet de periode 1987-1989 bevat, er statistisch deels hoog significante trends kunnen worden gegenereerd.

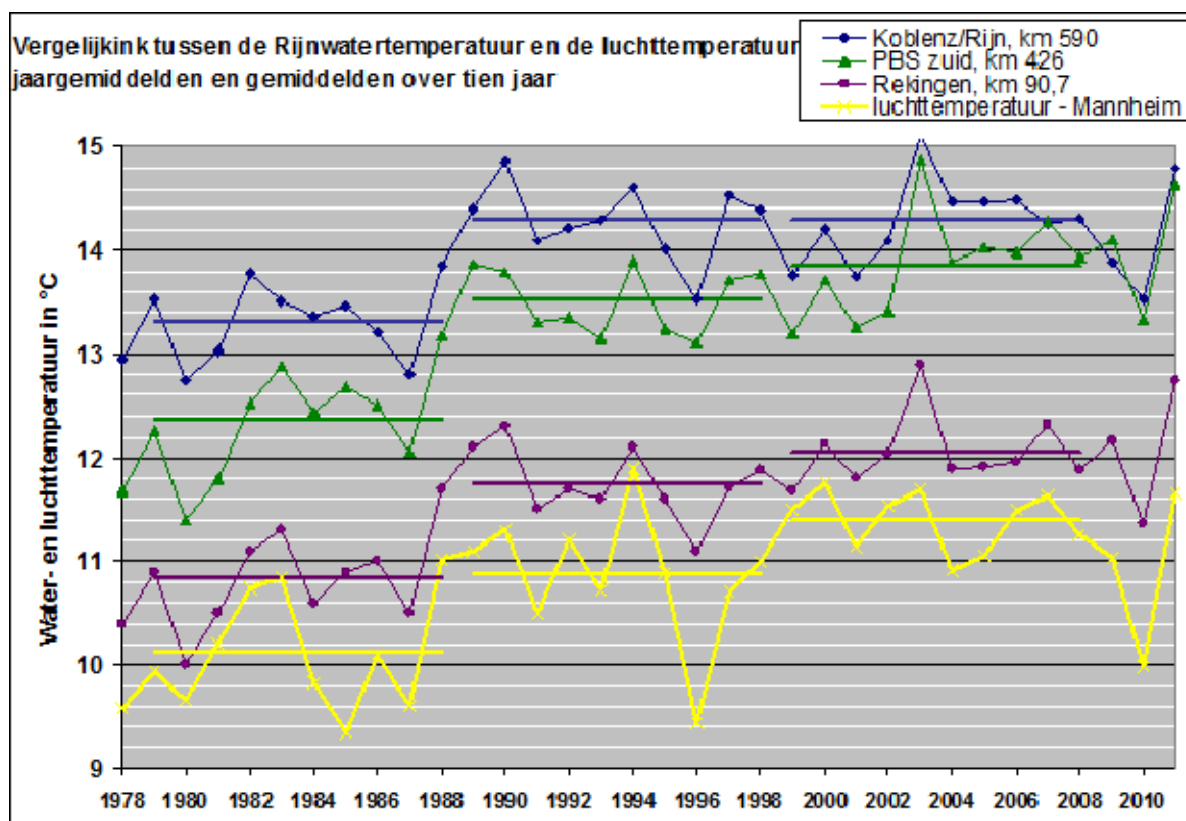


Figuur 5.4-1: Jaargemiddelde temperatuur van het Rijnwater tussen 1978 en 2011 op vijf meetlocaties in de Hoogrijn, Duits-Franse Bovenrijn en de Middenrijn

5.5 Correlatieanalyse

Volgens Haag [Haag 2009] worden lucht- en riviertemperaturen grotendeels door dezelfde klimaatfactoren geregeerd. Daarom zou er in de temperatuur van rivieren een vergelijkbare trend zichtbaar moeten zijn. Echter, omdat meetreeksen van de watertemperatuur meestal een veel kortere periode bestrijken dan die van de luchttemperatuur zijn er slechts relatief weinig onderzoeken naar de historische ontwikkeling van de watertemperatuur beschikbaar [Webb 1996].

In figuur 5.5-1 zijn de jaargemiddelde watertemperaturen op de meetlocatie Koblenz/Rijn, het pomp- en behandelstation zuid van de BASF en de meetlocatie Rekingen vergeleken met de luchttemperaturen bij Mannheim; tevens zijn de gemiddelden over tien jaar weergegeven vanaf 1979-1988. Tussen het eerste (1979-1988) en het tweede decennium (1989-1998) stijgt de watertemperatuur met 0,9 °C bij Rekingen, met 1,0 °C bij Koblenz en met 1,1 °C bij het pomp- en behandelstation zuid van de BASF, terwijl de sprong in de luchttemperatuur 0,75 °C bedraagt.



Figuur 5.5-1: Vergelijking van de Rijnwatertemperatuur en de luchttemperatuur: jaargemiddelden en gemiddelden over tien jaar (gemiddelden over tien jaar vanaf 1979-1988 = gekleurde horizontale strepen)

Uit de directe vergelijking van de watertemperatuur bij het pomp- en behandelstation zuid van de BASF met het naburige luchtmeetstation van de Duitse meteorologische dienst in Mannheim blijkt dat de langjarig gemiddelde watertemperatuur tussen 2 °C en 2,3 °C hoger is dan de luchttemperatuur. Dit komt goed overeen met bekende evaluaties uit de literatuur.

In de studie van Greis [Greis, 2007] zijn bepaalde stations in het Rijnstroomgebied ook onderzocht op de correlatie tussen lucht- en watertemperatuur op dicht bij elkaar gelegen locaties. Voor de watertemperatuurstations Koblenz en Karlsruhe zijn er correlatiecoëfficiënten berekend van 0,898 en 0,900. Dit betekent dat er in deze gevallen een zeer goede correlatie is tussen de lucht- de en watertemperatuur.

Tabel 5.5-1: Correlatiecoëfficiënten tussen de gegevens van watertemperatuur- en luchttemperatuurstations (bron: Greis 2007)

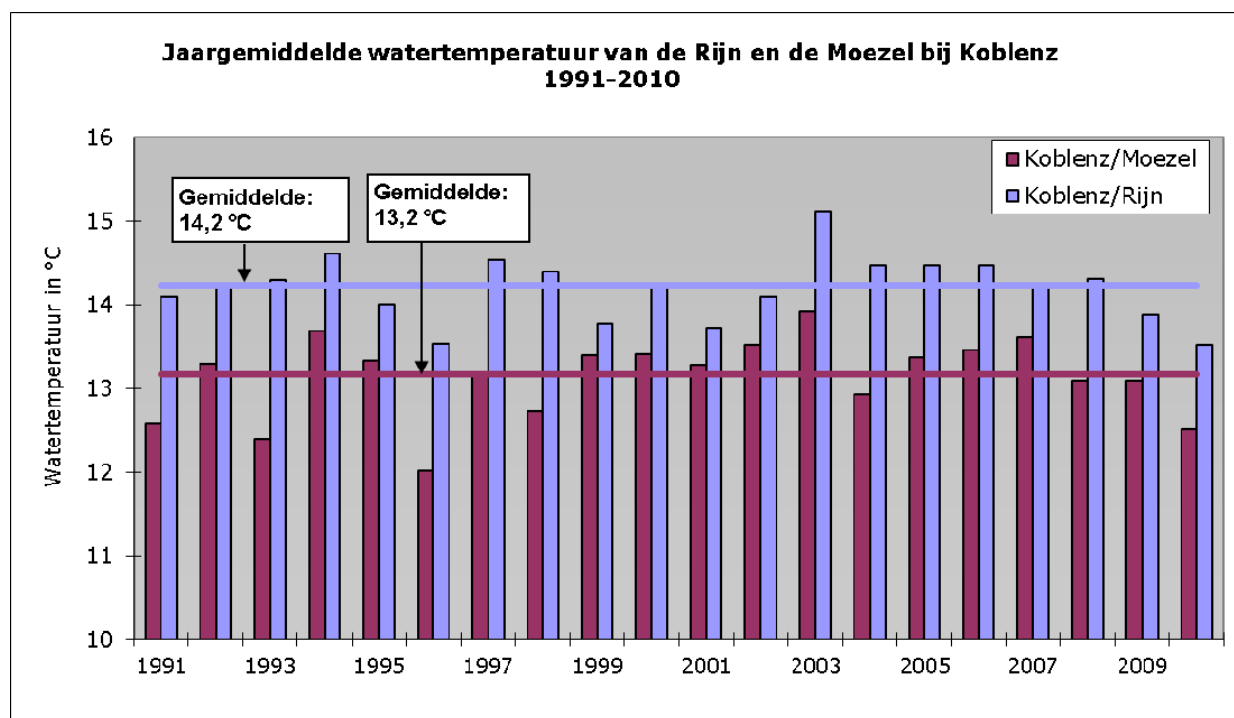
Watertemperatuur-station	Luchttemperatuur-station	Onderzoekperiode	Correlatiecoëfficiënt
Koblenz	Koblenz-Horchheim	1978 tot 2007	0,898
Karlsruhe	Karlsruhe	1988 tot 2007	0,900

Uit de tevens uitgevoerde kruiscorrelatie is gebleken dat er op de afzonderlijke stations sprake is van een maximale correlatie tussen de luchttemperatuur en de watertemperatuur bij een verschuiving van een à drie dagen.

Voor de Rijn en de Neckar zijn er maximale correlatiecoëfficiënten vastgesteld bij een verschuiving van twee dagen (stations Koblenz/Rijn, Besigheim/Neckar en Poppenweiler/Neckar) en drie dagen (Rockenau/Neckar en Karlsruhe/Rijn).

5.6 Invloed van grote zijrivieren op de watertemperatuur van de Rijn

Uit de vergelijking van de seizoensgemiddelde watertemperatuur van de Rijn en de Moezel bij Koblenz over de afgelopen twintig jaar blijkt dat het verschil in de herfst en de winter gemiddeld respectievelijk 1,7 °C en 1,8 °C bedraagt, terwijl de gemiddelde watertemperatuur van de Rijn en de Moezel in de zomer even hoog is. Gemiddeld genomen is de Moezel in de genoemde periode 1 °C koeler dan de Rijn. Puur rekenkundig beschouwd en uitgaande van een gemiddelde afvoerverhouding van 1:5 ten opzichte van de Rijn bij Koblenz betekent dit dat de Moezel de Rijn na vermenging met 0,2 °C afkoelt (figuur 5.6-1).



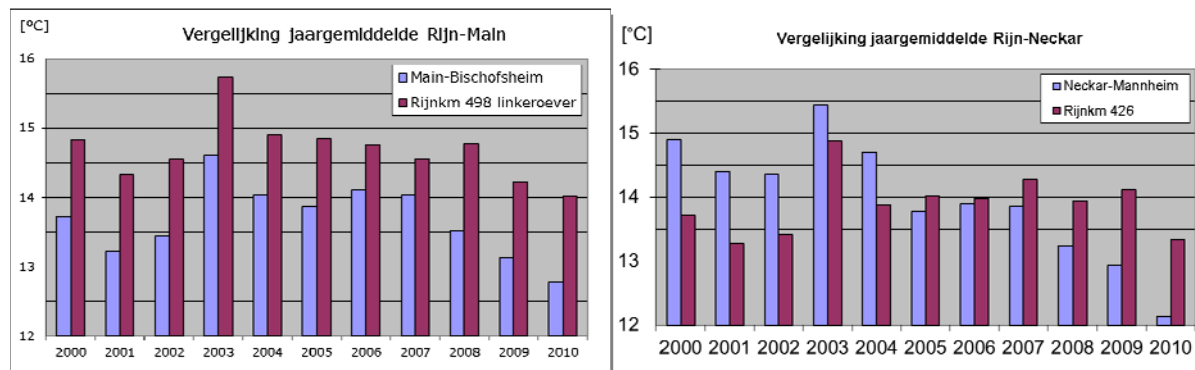
Figuur 5.6-1: Vergelijking van de jaargemiddelde watertemperatuur van de Rijn en de Moezel bij Koblenz tussen 1991 en 2010

Analoog hieraan zijn de watertemperaturen van de Rijn bij Mainz (linkeroever) vergeleken met de gegevens van de Main bij Bischofsheim (figuur 5.6-2a). Ook hier is er sprake van een temperatuurverschil van 1 °C dat duidelijk waarneembaar is in de herfst en de winter, maar ontbreekt in de zomer.

Bij een vergelijking van de watertemperatuur van de Rijn en de Neckar ter hoogte van Mannheim valt op dat de jaargemiddelden van de Neckar dalen en onder die van de Rijn komen te liggen (figuur 5.6-2b). Dit verschijnsel kan worden toegeschreven aan de stillegging van de kerncentrale Obrigheim in mei 2005. Gemiddeld over de periode 2006-2010 heeft daarom ook de Neckar bijgedragen aan een kleine afkoeling van het Rijnwater (ongeveer 0,1 °C gerelateerd aan de MQ bij Worms).

WT in °C Gemiddelde 2000-2010	Main Bischofs- heim	Rijnkm 498 linkeroever	delta T
jaargemiddelde	13,7	14,7	-1,0
voorjaar	12,4	13,1	-0,7
zomer	22,4	22,2	0,2
najaar	14,7	16,0	-1,3
winter	5,0	7,4	-2,3

WT in °C	Mannheim Neckar	Rijnkm 426	delta T
gemiddelde 2000-2004	14,8	13,8	0,93
gemiddelde 2006-2010	13,2	13,9	-0,72



Figuur 5.6-2a/b: Vergelijking van de jaargemiddelde watertemperatuur van de Rijn en de Main c.q. de Rijn en de Neckar tussen 2000 en 2010, inclusief samenvattende tabel

In tegenstelling tot de Rijn zelf bereiken de zijrivieren van de Duits-Franse Bovenrijn en de Middenrijn in de winter vaak lage temperaturen rond 0 °C en soms wordt er ook sterke ijsvorming waargenomen. Zoals in hoofdstuk 5.3 wordt toegelicht, zijn er in de Rijn bij Koblenz in de periode 1978-2011 alleen in zeven jaren (daggemiddelde) watertemperaturen onder 2 °C gemeten.

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

Al in de jaren zeventig van de afgelopen eeuw heeft de ICBR zich, in het licht van de warmtelozingen van bestaande en nog geplande energiecentrales, beziggehouden met vragen rond warmtebelasting. Na de extreem hete zomer van 2003 heeft de ICBR, zoals hierboven al is uitgelegd, de inventarisatie van de warmtelozingen uit 1989 geactualiseerd voor het jaar 2004 [ICBR 2006]. Gelet op de reeds door de klimaatverandering gestegen watertemperaturen (met rond 1 à 2 °C) wordt er in tabel 5.7-1 een vergelijking gemaakt van de theoretisch mogelijke temperatuurstijging als gevolg van warmtelozingen, gerelateerd aan de gemiddelde afvoer in Worms (1.400 m³/s). Tot 2010 vond ongeveer 60% van de grote warmtelozingen op de Rijn plaats op een kort traject van de Duits-Franse Bovenrijn tussen Karlsruhe en Worms. Mits alle emittenten hun vergunde capaciteiten tegelijkertijd volledig benutten, kunnen deze lozingen, gerelateerd aan de gemiddelde afvoer bij Worms, na volledige menging en zonder inachtneming van natuurlijke processen, leiden tot een theoretische temperatuurstijging van maximaal 2,6 °C. De daadwerkelijk meetbare gemiddelde temperatuurstijging bedraagt bij Mainz echter circa 1,4 °C (gerelateerd aan MQ) en neemt tot Koblenz verder af tot circa 1 °C. Het kleine verschil kan in hoofdzaak worden verklaard door het feit dat er minder warmte wordt geloosd dan vergund en door de uitwisseling van warmte (verdamping en convectie) met de atmosfeer op het riviertraject tot Mainz c.q. Koblenz. Vermoedelijk kan de temperatuurstijging tot Mainz in de eerste plaats worden toegeschreven aan de warmtelozingen in de regio Mannheim/Ludwigshafen en van de kerncentrale Biblis en slechts in de tweede plaats aan

de natuurlijke opwarming in de loop van de rivier (over 50 à 60 km). De invloed van de duidelijk kleinere warmtelozing van de kerncentrale Philippsburg, die bovendien veel verder weg is gelegen, is daarentegen waarschijnlijk minder goed meetbaar in Mainz. De modellering van de watertemperatuur op dit Rijntraject zal naar verwachting nauwkeurigere informatie opleveren.

Een daling van de laagwaterafvoer in de zomer tot de halve MQ of lager, zoals bijv. in 2003, kan leiden tot kritieke situaties, omdat dezelfde warmtelozing bij een lagere afvoer en dus lagere koelcapaciteit resulteert in hogere watertemperaturen [Webb 2006].

In de Duitse waterwetgeving zijn er daarom voor de koelprocessen grenswaarden voor de inname en de lozing van koelwater vastgelegd die afhankelijk zijn van de locatie van de energiecentrales en het riviertype. Deze grenswaarden zijn gebaseerd op de aanbevelingen van de werkgemeenschap van de Duitse deelstaten op het vlak van water (*Länderarbeitsgemeinschaft Wasser*). Zodra de grenswaarden worden bereikt, moeten energiecentrales terug in capaciteit om de warmtelozing op het ontvangende water te verminderen [UBA 2010, p. 141].

In de andere Rijnsoeverstaten zijn er vergelijkbare maatregelen genomen.

Tabel 5.7-1: Overzicht van grote, vergunde warmtelozingen tussen Karlsruhe en Mainz, de gemiddelde afvoer in Worms en de hieruit resulterende theoretische stijging van de temperatuur van het Rijnwater

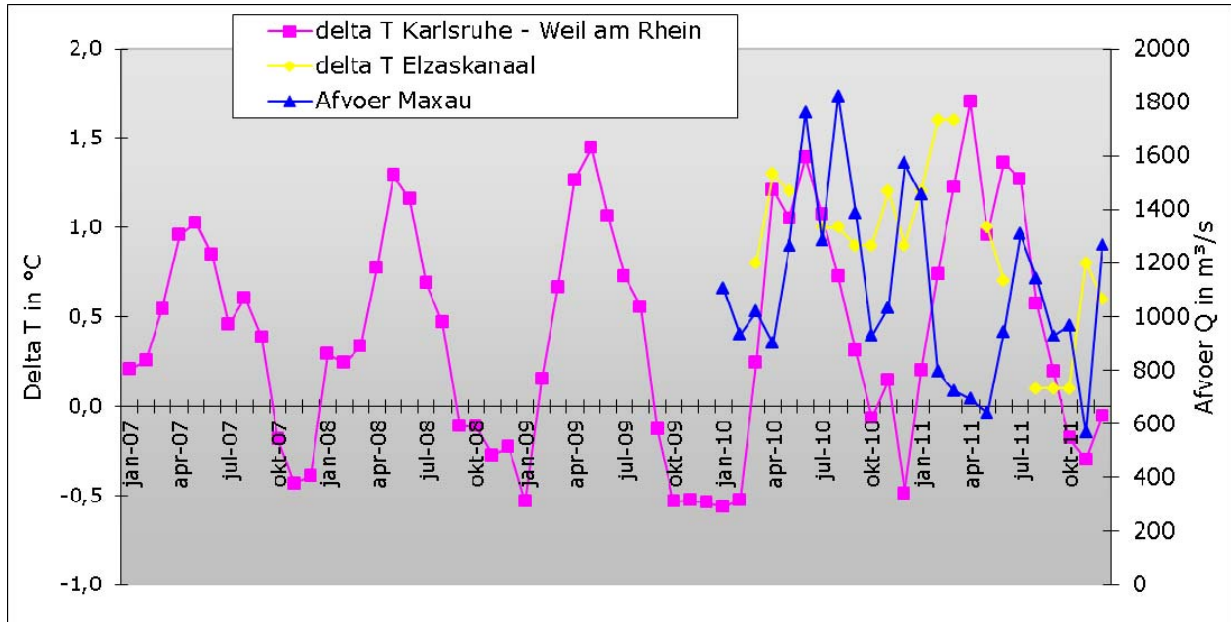
Warmte-emittent	Gemiddelde*	MQ [m ³ /s]	Theoretische temperatuurstijging [°C]
Kerncentrale Philippsburg	4.265	1.400	0,7
Kerncentrale Biblis	4.940	1.400	0,8
Totaal: Karlsruhe-Worms	15.000	1.400	2,6
delta T: Mainz-Karlsruhe 2010			1,4

* Vergunde warmtelozingen conform de inventarisatie van de warmtelozingen in 2004 uit ICBR-rapport 151 [ICBR 2006]

Hieronder wordt de mogelijke invloed onderzocht van de thermische puntlozingen van de kerncentrale Fessenheim in de Elzas op de watertemperatuurmetingen in het meer dan 130 km stroomafwaarts gelegen Karlsruhe. Fessenheim staat voor een vergunde warmtelozing van 3.520 MW [ICBR 2006] en is daarmee sinds 1977 de grootste antropogene warmte-emittent op het traject tussen Bazel en Karlsruhe. Voor deze analyse is de gepubliceerde, maandgemiddelde stijging van de temperatuur [Umwelt & Strahlenschutz] in de onmiddellijke omgeving van het Elzaskanaal geëvalueerd van maart 2010 tot maart 2012. De maandelijkse temperatuurstijging lag tussen 0 °C (tijdens revisiebeurten van de kerncentrale) en 2,3 °C (april 2010). De gemiddelde temperatuurstijging van het Elzaskanaal bedroeg in deze periode 0,9 °C. Het afvoerregime van het Elzaskanaal is voor alle afvoersituaties geregeld in een Duits-Frans verdrag. Hierin is bepaald dat tot een afvoer van 1.500 m³/s het merendeel van het water wordt afgevoerd via het Elzaskanaal en slechts een klein deel in de zogenaamde oude loop van de Rijn blijft. Dat betekent dat de opwarming van het Elzaskanaal op de meeste dagen van het jaar ongeveer overeenkomt met de niet-natuurlijke opwarming van het Rijnwater over het gehele dwarsprofiel.

Uit de weergave van het maandgemiddelde temperatuurverschil tussen Karlsruhe en Weil am Rhein in figuur 5.7-1 blijkt dat de watertemperatuur op dit riviertraject de meeste maanden stijgt en alleen in de herfst en de winter met maximaal 0,5 °C kan dalen. Op het 130 km lange, door stuwen gereguleerde traject tot het meetstation Karlsruhe wordt nagenoeg het niveau bereikt dat resulteert uit de natuurlijke warmte-uitwisseling tussen water en atmosfeer. Zoals in hoofdstuk 4 wordt uitgelegd, kan er in het dwarsprofiel ter hoogte van het meetstation Karlsruhe evenmin een temperatuurgradiënt worden

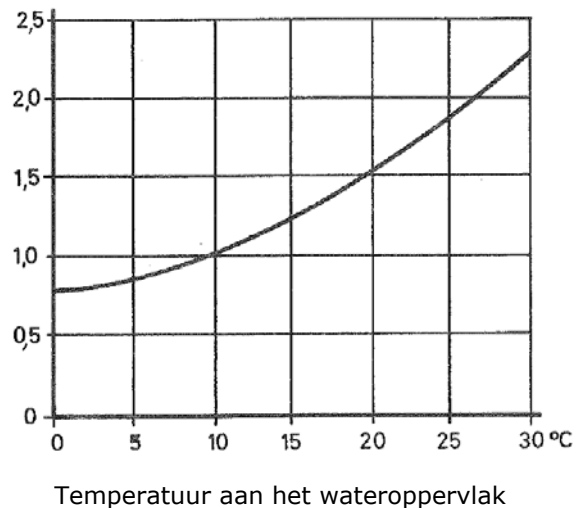
vastgesteld. De weergegeven warmtelozing (maandgemiddelden 2010-2011) op het Elzaskanaal ter hoogte van Fessenheim kan echter niet worden gecorreleerd met het temperatuurverloop. Blijkbaar wordt de invloed van deze warmtelozing gemaskeerd door natuurlijke processen (opwarming en afkoeling), waardoor ze niet meer meetbaar is. Op het 130 km lange, door stuwen gereguleerde traject tot het meetstation Karlsruhe wordt nagenoeg het niveau bereikt dat resulteert uit de natuurlijke warmte-uitwisseling tussen water en atmosfeer. Ook hierover zal de modellering van de watertemperatuur nauwkeurigere informatie opleveren.



Figuur 5.7-1: Maandgemiddeld temperatuurverschil tussen Karlsruhe en Weil am Rhein in de periode 2007-2011, maandgemiddelde afvoer bij Karlsruhe-Maxau en temperatuurstijging in het Elzaskanaal bij Fessenheim in 2010 en 2011

In principe moet er gelet op de resultaten die zijn weergegeven in figuur 5.7-2 en op het onderzoek van Glaser [Glaser 1975] worden vastgesteld dat als gevolg van dezelfde warmtelozing in vergelijkbare afvoeromstandigheden bij een watertemperatuur van 20 °C dubbel zoveel warmte wordt afgegeven door verdamping en convectie als bij een watertemperatuur van 5 °C.

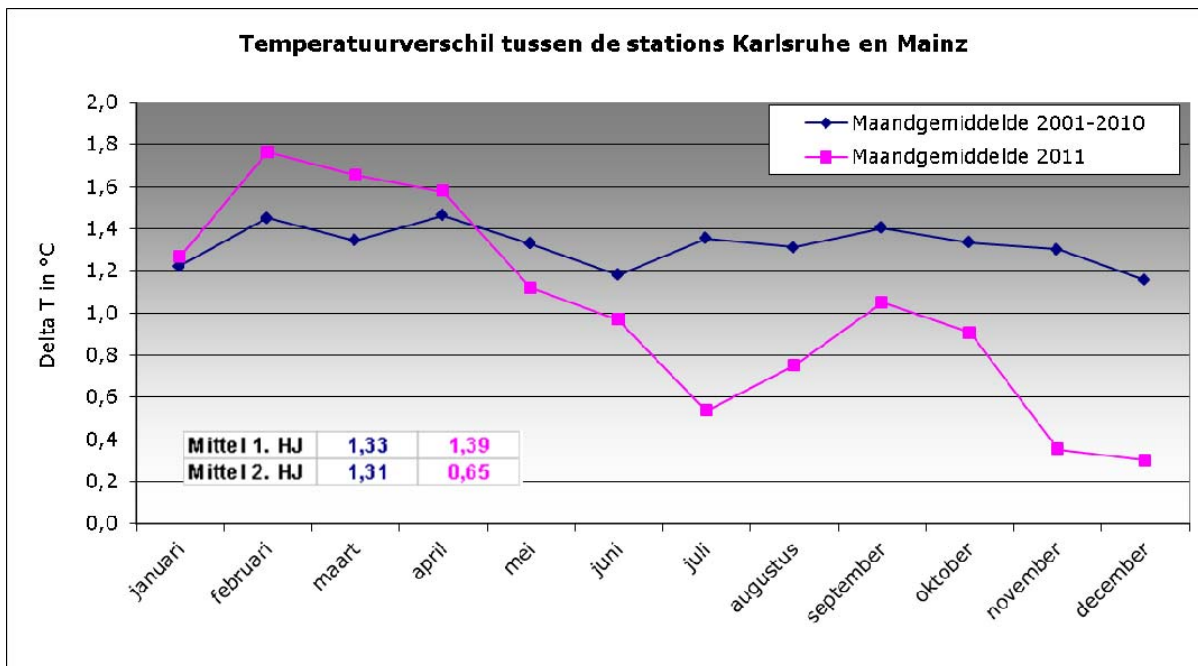
Warmteafgifte in verhouding tot de afgifte bij een oppervlaktetemperatuur van 10 °C



Figuur 5.7-2: Warmteafgifte gerelateerd aan de temperatuur aan het wateroppervlak (bron: Glaser 1975)

6. Ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater sinds maart 2011

Na de kernramp in Fukushima (Japan) heeft de Duitse Bondsregering in maart 2011 besloten om acht kerncentrales die voor 1981 in bedrijf waren genomen voor drie maanden stil te leggen. Na de inwerkingtreding van de dertiende novelle op de Atoomwet in augustus 2011 zijn deze kerncentrales definitief gesloten. In het Rijngebied tussen Karlsruhe en Mainz had dit betrekking op de productie-eenheden Biblis I, Biblis II en Philippsburg I. Aan de Neckar ging het om Neckarwestheim I. Rond de helft van de warmtelozingen op dit Rijntraject is afkomstig van deze centrales (conform de balans van de warmtelozingen in ICBR-rapport 151). Dientengevolge zou er een significante daling waarneembaar moeten zijn in het temperatuurverschil tussen de meetstations Mainz en Karlsruhe, waarvan het langjarig gemiddelde (1989-2010) bij 1,5 °C ligt. Figuur 6.1 toont het maandgemiddelde temperatuurverschil in 2011 ten opzichte van de maandgemiddelden over de periode 2001-2010. Door de stillegging van de kernreactoren vanaf medio maart 2011 lijkt het temperatuurverschil in de tweede helft van het jaar te zijn gehalveerd vergeleken met de eerste helft van het jaar en met het langjarige gemiddelde. Het Duitse, deterministische model op fysische basis, dat thans wordt ontwikkeld aan de Rijn, zou de orde van grootte moeten kunnen bevestigen. Deze ontwikkeling wordt de komende jaren verder gevolgd en statistisch onderbouwd. De puur statistische weg kan de vermindering van de warmtebelasting preciseren, als andere energiecentrales aan de Rijn of zijn zijrivieren tenminste niet weer meer warmte gaan lozen.



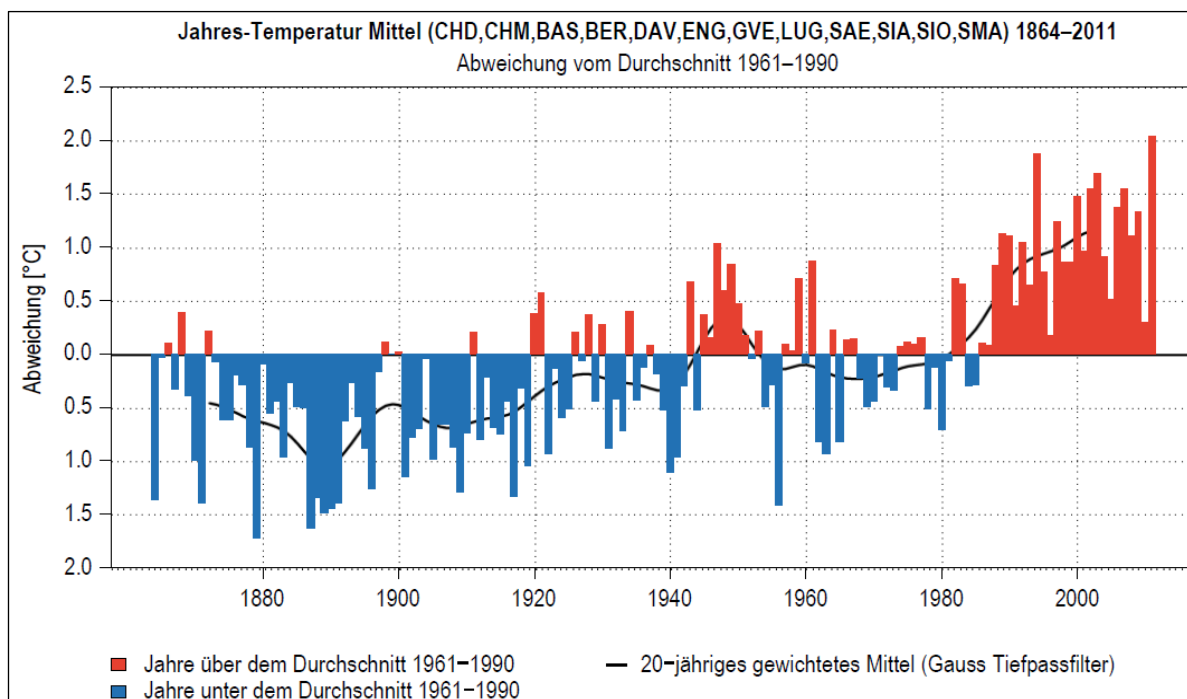
Figuur 6-1: Temperatuurverschil tussen de meetstations Karlsruhe en Mainz, vergelijking van de ontwikkeling van de maandgemiddelden van 2011 met de maandgemiddelden over de periode 2001-2010

7. Vooruitblik

De in het onderhavige rapport voorgestelde resultaten bevestigen de klimaatgerelateerde stijging van de watertemperatuur met ca. 1 °C over de afgelopen drie decennia die tot dusver in de literatuur voor afzonderlijke regio's in het Rijnstroomgebied is waargenomen. Er is duidelijk naar voren gekomen dat de temperatuur niet geleidelijk is gestegen, maar voornamelijk resulteert uit een klimaateffect dat zich aan het einde van de jaren tachtig van de twintigste eeuw heeft voorgedaan. Noch in de Hoogrijn noch in de Duits-Franse Bovenrijn of de Middenrijn kunnen er significante trends worden vastgesteld in de stijging van de watertemperatuur in de afgelopen twee decennia. Dit

geldt tot vandaag in het bijzonder ook voor de zomer, waarvoor klimaatdeskundigen stijgende luchttemperaturen voorspellen.

Volgens een Zwitsers rapport [BAFU 2012] is de jaargemiddelde luchttemperatuur in Zwitserland in de periode 1912-2011 met meer dan 1,5 °C gestegen, waarbij de opwarming de afgelopen dertig jaar is versneld (figuur 7-1).



Figuur 7-1: Afwijking tussen de jaargemiddelde luchttemperatuur en het gemiddelde over de periode 1961-1990 (Bron: BAFU 2012, gemiddelde voor Zwitserland)

Tussen 1901 en 2006 is de gemiddelde luchttemperatuur in Duitsland met bijna 0,9 °C gestegen; in het zuidwesten van het land bedraagt de stijging zelfs 1,2 °C [DAS 2008]. Recente resultaten van het KLIWA-project (klimaatverandering en gevolgen voor het waterbeheer) tonen positieve significante trends in de jaargemiddelde luchttemperaturen voor de tijdreeks 1941-2010, die gaan van 1,0 °C in het gebied van de Hoogrijn en de Duits-Franse Bovenrijn over 1,1 °C in de regio rond de Nahe en de Middenrijn tot 1,2 °C in het Neckargebied [KLIWA 2012]. De afgelopen tien jaar is de opwarming veel sterker dan in de tijdreeks 1931-2000.

Als deze trend doorzet, zou ook de watertemperatuur een bepaalde invloed moeten ondervinden, zeker als ook het afvoerregime van de Rijn zodanig verandert dat laagwaterperiodes precies in de zomer toenemen [Belz 2010]. Op dit moment werkt de ICBR aan een studie naar de ontwikkeling van de temperatuur van het Rijnwater in de komende decennia.

Andere onderzoeken in het kader van het KLIWA-project maken duidelijk dat de klimaatverandering invloed heeft op de fysisch-chemische omstandigheden in het water en op de samenstelling van de aquatische levensgemeenschap [UBA 2010]. Daarbij wordt er vooral gewezen op de ernstige negatieve gevolgen die een temperatuurstijging voor de zelfreinigende processen kan hebben.

Een bijwerking van de stillegging van enkele energiecentrales in het kader van de kentering in het Duitse energiebeleid in 2011 is de in Mainz meetbare vermindering van de warmtebelasting op de noordelijke Duits-Franse Bovenrijn (figuur 6-1). Het valt af te wachten of deze ontwikkeling een duurzaam effect zal hebben op de watertemperatuur van de Rijn. In de bovengenoemde, nog uit te werken studie naar de toekomstige ontwikkeling van de watertemperatuur zou er daarom naast geselecteerde klimaatscenario's ook rekening moeten worden gehouden met varianten van "scenario's van warmtelozingen".

Bibliografie

- BAFU (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt BAFU (uitg.), Bern, 2012. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 p. – In: http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01670/index.html?lang=de&show_kat=/publikationen/00014
- Belz, J. U. (2010): Das Abflussregime des Rheins im 20. Jahrhundert. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, HyWa 54, H.1, p. 4-17.
- BUWAL, BWG, MeteoSchweiz, 2004: Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 p.
- DAS (2008): Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, beschlossen am 17.12.2008, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf
- Deltares 2012: Water temperature in the River Meuse - Exploring temperature-related issues in the Dutch part of the river basin. Project 1205262-000. Deltares, augustus 2012.
- Forstner, A. E. (1894): Die Temperatur fließender Gewässer Mitteleuropas. - Geographische Abhandlungen, Band V, Heft 4, p. 1-95. Universität Wien.
- Glaser, H. (1975): Zusätzliche Wärmeabgabe eines Fließgewässers nach einer Fremdwärmeeinleitung (nicht veröffentlichter Bericht an das Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt Baden-Württemberg, Stuttgart 1975).
- Greis, S. (2007): Gewässertemperaturentwicklung und industrieller Kühlwasserbedarf. Eine statistische Analyse der Wassertemperaturentwicklung ausgewählter deutscher Flüsse im Zuge rezenter Klimatrends und deren Bedeutung für den industriellen Kühlwasserbedarf. - Diplomarbeit, Universität Würzburg, 146 p. (niet gepubliceerd).
- Greis, S., U. Strauch und B. Rothstein (2011): Untersuchungen zur Gewässertemperaturentwicklung ausgewählter Flüsse mit thermischen Kraftwerksstandorten in Deutschland. – Korrespondenz Wasserwirtschaft 2011 (4) Nr. 1, p. 35-40.
- Haag, I. (2009): Die mögliche Wirkung des Klimawandels auf Wassertemperaturen von Fließgewässern. Uitgever: WWF Deutschland, Frankfurt am Main.
- Hari, R. E., D. M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm und H. Güttinger (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. - Global Change Biology 12(1), p. 10-26.
- ICBR (2006): Vergelijking van de warmtelozingen 1989 en 2004 langs de Rijn – ICBR-rapport 151. 4 p.
- ICBR (2009): Analyse van de stand van de kennis over de veranderingen die zich tot dusver hebben voorgedaan in het klimaat en over de gevolgen van de klimaatverandering voor de waterhuishouding in het Rijnstroomgebied – literatuurevaluatie. ICBR-rapport 174. 67 p.
- ICBR (2011): Studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn. ICBR-rapport 188. 28 p.
- ICBR (2013): 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. ICBR-rapport 204, 37 p.
- Jakob, A., Binderheim E.; Pfammatter, F. und Schädler, M. (2010): Temperaturen in Schweizer Fließgewässern - Langzeitbeobachtung. Gas-Wasser-Abwasser, 3/2010, p. 221-231

Jakob, A., Pfammatter, F. und Schädler, M. (2007): Veränderungen der Temperaturen in Fließgewässern 1976-2005. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz; Tafel 7.7. BAFU, Bern.

KLIWA 2012: Klimawandel in Süddeutschland. Monitoringbericht 2011. Uitgever: Arbeitskreis KLIWA, April 2012. <http://www.kliwa.de>

Lange, J. (2009): Studie Wärmelast Rhein. Uitgever: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, BUND 2009.

LAWA (2012): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer. Entwurf, Stand August 2012 -Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, 119 p.

Liefveld W.M. & Postma R. (2007): Two rivers: Rhine and Meuse. – Rijkswaterstaat Waterdienst. Lelystad, The Netherlands.

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>

Rothstein, B., U. Müller, S. Greis, J. Schulz, A. Scholten und E. Nilson (2008): Elektrizitätsproduktion im Kontext des Klimawandels. - Korrespondenz Wasserwirtschaft 2008 (1) Nr. 10, p. 555-561

Strauch, U. (2011): Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels. – Würzburger Geographische Arbeiten, Heft 106, 223 p. Selbstverlag des Instituts für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg.

UBA-Texte 47/2010: WASKlim - Entwicklung eines übertragbaren Konzeptes zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2010. <http://www.uba.de/uba-info-medien/4019.html>

Umwelt & Strahlenschutz – monatliche Information aus dem Kernkraftwerk Fessenheim: <http://fessenheim-de.edf.com>

Webb, B.W. (1996): Trends in stream and river temperature. - Hydrological Processes 10, p. 205-226.

Webb B.W., Hannah D.M., Moore R.D., Brown L.E. & Nobilis F. (2008): Recent advances in stream and river temperature research. - Hydrological Processes 22, p. 902-918.

Wundt, W. (1940): Beiträge zur Temperatur fließender Gewässer. Peterm. Mitt. 1940, H. 12, p. 399-406.

Wundt, W (1967): Der Temperaturgang an mitteleuropäischen Flüssen. Peterm. Mitt. 1967, H. 2, p. 81-88.